



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Die Bodenqualität in der Oase Bahariya (Ägypten) unter besonderer Berücksichtigung der Bodenversalzung“

Verfasserin

Regina Fleischanderl

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 453

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuerin / Betreuer:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Cyrus Samimi

Danksagung

Ich möchte zu allererst meinen lieben Studienkollegen danken für ihre Unterstützung und Motivation, für die gute Zusammenarbeit und das Zusammen-Feiern. Die einmalige Atmosphäre am Geographie-Institut wird mir immer in Erinnerung bleiben!

Ich danke besonders Ass. Prof. Dr. Peticzka, der für seine Studenten immer da ist und an den man sich immer wenden kann. Durch seine Unterstützung konnte ich mich fachlich weiterentwickeln. Ich möchte auch Ass. Prof. Dr. Holawe danken, der mir ebenfalls als echte Ansprechperson am Institut in Erinnerung bleiben wird. Vielen Dank an meinen Betreuer Prof. Dr. Cyrus Samimi für seine nicht enden wollende Geduld und Motivation.

Mein herzlicher Dank auch an alle, die mir im Zuge dieser Diplomarbeit geholfen haben: Frau Christa Hermann vom Physiogeographischen Labor der Universität Wien, die Studenten der Geographie Erlangen, Frau Ute Schmidt von Geographischen Labor der Universität Erlangen, Ass.-Prof. Dr. Wilfried Körner, und Frau Petra Körner vom Department of Environmental Geoscience. Nicht zuletzt möchte ich Dr. Baraa El Saied für seine außerordentliche Hilfsbereitschaft bei der Geländearbeit und der Statistischen Methodik danken, sowie Mahmoud Abdel Rhaman, der uns freiwillig als Übersetzer und Helfer zur Seite stand.

Mein besonderer Dank geht an alle Menschen, die mir während meines Studiums Freunde geworden sind. Danke Philipp und Susi für die gute Zeit! Danke Sabine, dafür dass ich immer wieder den Weg auf die Uni gefunden habe und für Vieles mehr.

Und eine Person möchte ich hier verewigen, die von Danksagungen nicht viel hält, der ich aber fast alles verdanke. Meine Schwester Ulli – danke für diesen schönen Tag!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	7
Diagrammverzeichnis.....	7
Kurzfassung	8
Abstract	9
1. Einleitung.....	10
1.1 Bedeutung der Oasenwirtschaft in Ägypten	10
1.2 Problematik der Oasenwirtschaft und jüngste Entwicklungen	10
1.3 Definitionen	12
1.3.1 Bodenqualität	12
1.3.2 Bodensalzgehalt	15
1.4 Zielsetzungen und Hypothesen der Arbeit.....	16
2. Untersuchungsgebiet	18
2.1 Geographische Lage.....	18
2.2 Klima und natürliche Vegetation der Sahara	20
2.3 Geologie und Geomorphologie	21
2.4 Hydrogeologie	23
3. Oasenwirtschaft	26
3.1 Klima	26
3.2 Böden.....	28
3.3 Bewässerung.....	30
3.3.1 Wassererschließung	30
3.3.2 Bewässerungsverfahren	31
3.3.3 Neulandgewinnung	32
3.3.4 Drainage	33
3.4 Kulturpflanzen	34
3.4.1 Datteln und Oliven	35
3.4.2 Getreide.....	36
3.4.3 Obst und Gemüse.....	37
3.4.4 Futterpflanzen	38
4. Methodik	40
4.1 Geländearbeit	40

4.1.1	Erhebungsdesign und Probenahme	40
4.1.2	Erhebung der Wasserqualität	42
4.1.3	Schwierigkeiten während der Geländeerhebung	42
4.2	Labormethodik	43
4.2.1	Probenvorbereitung	43
4.2.2	Lagerungsdichte	43
4.2.3	Korngrößenverteilung	44
4.2.4	Leitfähigkeit und Gesamtsalzgehalt	44
4.2.5	pH-Wert.....	45
4.2.6	Kationenaustauschkapazität (KAK)	45
4.2.7	Kohlenstoffgehalt	45
4.2.8	Gesamtstickstoff.....	46
4.3	Statistische Methoden.....	46
4.3.1	Deskriptive Statistik.....	46
4.3.2	Korrelation.....	46
4.3.3	Transformation und Standardisierung	47
4.3.4	Clusteranalyse	47
4.3.5	Behandlung fehlender Werte.....	47
4.3.6	Ordination	48
5.	Ergebnisse	50
5.1	Parameter der Bodenqualität.....	50
5.1.1	Lagerungsdichte	50
5.1.2	Korngrößenverteilung	51
5.1.3	Salzgehalt	52
5.1.4	pH-Wert.....	54
5.1.5	Kationenaustauschkapazität	55
5.1.6	Kohlenstoff	56
5.1.7	Stickstoff.....	58
5.2	Umweltparameter	59
5.2.1	Drainage	59
5.2.2	Höhe und Hangneigung.....	59
5.2.3	Deckung.....	60
5.2.4	Bewässerung	61
5.2.5	Wasserqualität	62

5.3	Leitprofile.....	63
5.3.1	Teilgebiet Mamour	63
5.3.2	Teilgebiet Zabú	66
5.3.3	Teilgebiet Quasaa	73
5.3.4	Teilgebiet Bawiti	75
5.4	Clusteranalyse.....	80
5.5	Ordination.....	82
5.5.1	Kanonische Korrespondenzanalyse.....	82
5.5.2	Redundanzanalyse (RDA)	83
6.	Diskussion.....	86
6.1	Darstellung der Bodenqualität anhand der Leitprofile	86
6.2	Interpretation von Clusteranalyse und Ordination	89
6.2.1	Jüngere und ältere Teilgebiete im Vergleich.....	90
6.2.2	Die Extremstandorte der Oase	91
6.3	Der Einfluss der Umweltparameter auf die Bodenqualität.....	93
6.3.1	Deckung und Höhenlage	93
6.3.2	Bewässerung und Wasserqualität.....	94
6.4	Die Bodenqualität anhand ausgewählter Bodenparameter	96
6.4.1	Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte	96
6.4.2	Elektrische Leitfähigkeit	97
6.4.3	pH-Wert.....	99
6.4.4	Ionenverhältnis und KAK	100
7.	Conclusio und Ausblick.....	102
	Literaturverzeichnis.....	104
	Anhang	109
	Eidesstattliche Erklärung.....	116
	Lebenslauf	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Lage Bahariyas und anderer Oasen der Westlichen Wüde Ägyptens	18
Abbildung 2: Die Teilgebiete der Oase Bahariya.....	19
Abbildung 3: Klimadiagramm nach Walter für die Station Bahariya	20
Abbildung 4: Geologische Übersichtskarte Ägyptens	22
Abbildung 5: Kalksteinmonolithen in der Weißen Wüste.....	23
Abbildung 6: Gesteinslagen unterhalb der Oasen Dakhla und Bahariya	24
Abbildung 7: Verteilung und Mächtigkeit der Grundwasserreserven der Libyschen Wüste ..	25
Abbildung 8: Tagesverlauf des Einfalls der Globalstrahlung innerhalb der Oase Tozeur	27
Abbildung 9: Tagesgang der relativen Feuchte in der Oase Tozeur (2, 5 und 12 m Höhe)	28
Abbildung 10: Salzgehalte in unterschiedlichen Bodentiefen.	29
Abbildung 11: charakteristisches Bodenprofil eines Solonchak.	30
Abbildung 12: Brunnensysteme in Bahariya.	31
Abbildung 13: Alter Palmenhain in Zabou (Bahariya)	35
Abbildung 14: Ein Bauer auf einem typischen Alfalfa-Feld in Quasaa.....	39
Abbildung 15: Probenahme mittels Stechzylinder.....	41
Abbildung 16: Lagerungsdichte in den Teilgebieten.....	50
Abbildung 17: Boxplots zur Korngrößenverteilung in den Teilgebieten.....	52
Abbildung 18: Boxplot der Leitfähigkeitsmessungen in der Oase	52
Abbildung 19: Aufgegebenes Feld am Mamour-See	53
Abbildung 20: Leitfähigkeit (in $\mu\text{S}/\text{cm}$), dargestellt nach Teilgebieten.....	53
Abbildung 21: Boxplot des aktuellen und potenziellen pH-Werts.....	54
Abbildung 22: Die KAKpot in den Teilgebieten	55
Abbildung 23: Boxplots zur Kohlenstoffverteilung in den Teilgebieten	57
Abbildung 24: Verteilung des Stickstoffgehalts in den Teilgebieten	58
Abbildung 25: Boxplots zum C/N-Verhältnis in den Teilgebieten.....	58
Abbildung 26: Summe der mittleren Deckungsgrade nach Teilgebieten in Prozent.....	60
Abbildung 27: durchschnittliche Deckung der Baumschicht	61
Abbildung 28: Bewässerungsdauer nach Teilgebieten	61
Abbildung 29: Pairplot der Daten zur Wasserqualität	62
Abbildung 30: Profil 1 (Mamour)	63
Abbildung 31: Skizze Profil 2 (Mamour).....	65
Abbildung 32: Profil 3 (Zabu).....	67

Abbildung 33: Profil 4 (Zabu).....	69
Abbildung 34: Profil 5 (Zabu).....	71
Abbildung 35: Profil 6 (Quasaa)	73
Abbildung 36: Profil 7 (Bawiti)	75
Abbildung 37: Profil 8 (Bawiti)	77
Abbildung 38: Profil 9 (Bawiti)	78
Abbildung 39: Dedrogramm der Clusteranalyse nach Ward's Method	80
Abbildung 40: Niveau der Fusionslevel für die obersten Fusionspunkte	81
Abbildung 41: Ergebnis der CCA.....	82
Abbildung 42: Ergebnis der Redundanzanalyse	84
Abbildung 43: Schematische Darstellung der Böden und ihrer Qualität.....	88
Abbildung 44: Biplot der RDA. Darstellung mit Labels der Objekte.....	89
Abbildung 45: Extremstandorte	92
Abbildung 46: Gerstenfeld in Mamour (EC_e von 16 dS/m)	99
Abbildung 47: Entwurf einer Bodenversalzungskarte	109
Abbildung 48: Korngrößendreieck Quasaa	114
Abbildung 49: Korngrößendreieck Al Mamour	114
Abbildung 50: Korngrößendreieck Al Zabu	115
Abbildung 51: Korngrößendreieck Al Bawiti	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Bodenqualität	14
Tabelle 2: Ausgewählte Einflussfaktoren auf den Bodensalzgehalt	16
Tabelle 3: Korrelationen zwischen Lagerungsdichte und anderen Parametern.....	51
Tabelle 4: Korrelationen zwischen der Leitfähigkeit und anderen Parametern	54
Tabelle 5: Korrelationen des pH _{pot} und anderen Parametern	54
Tabelle 6: Korrelation der KAK _{pot} mit anderen Parametern.....	55
Tabelle 7: Korrelationen von TOC und C _{anorg} mit anderen Parametern.....	57
Tabelle 8: Korrelationen der Bewässerungsdauer mit Bodenparametern	61
Tabelle 9: Eigenwerte der DCA-Achsen.....	83
Tabelle 10: Eigenwerte der ersten 9 Achsen der RDA	84
Tabelle 11: Vorkommen von Bodentypen und Charakteristika nach Teilgebieten	86

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Durchschnittliche Anteile der Kornfraktionen (in %)	51
Diagramm 2: Anteile der Kationen an der KAK in den Teilgebieten	56
Diagramm 3: KAK und EC _e im Profil 1 (Mamour)	64
Diagramm 4: austauschbare Kationen und Leitfähigkeit im Profil 2 (Mamour).....	66
Diagramm 5: Profil 3 (Zabu)	68
Diagramm 6: Profil 4 (Zabu).	70
Diagramm 7: Profil 5 (Zabu).	72
Diagramm 8: Profil 6 (Quasaa)	74
Diagramm 9: Profil 7 (Bawiti).	76
Diagramm 10: Profil 8 (Bawiti).	77
Diagramm 11: Profil 9 (Bawiti).	79
Diagramm 12: Anteil der Teilgebiete in den Einheiten der Clusteranalyse	81
Diagramm 13: Bewässerungsdauer und Salinität des Bewässerungswassers.....	95

Kurzfassung

Die Oase Bahariya in der „Westlichen Wüste“ Ägyptens wird durch traditionelle Bewässerungstechniken und der Dattelpalme als Hauptkulturpflanze charakterisiert. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts im Zuge des Projekts „Neues Tal“ stieg die landwirtschaftliche Produktion durch Neulandgewinnung in der Wüste deutlich an. Als Folge der Bewässerung von Neuland über Tiefbrunnen, fällt der Grundwasserspiegel ab, wodurch viele der alten Brunnen austrocknen und die Kultivierung teilweise aufgegeben wird. Ein weiteres Problem des Bewässerungslandbaus in ariden Gebieten ist die Bodenversalzung. Sie wird durch die negative Wasserbilanz und der hohen potenziellen Evaporation verursacht, aber oft durch mangelhafte Bewässerung und Drainage verstärkt. Das führt zu kapillarem Aufstieg salzhaltigen Wassers und zu Ausfällung der Salze im Boden.

In dieser Arbeit wird die Bodenqualität mit besonderer Berücksichtigung von Bodensalzgehalt und Pflanzenproduktion anhand ausgewählter Parameter untersucht. Auf jeder Untersuchungsfläche wurden mindestens drei Bodenproben genommen, gemischt und auf Korngrößenverteilung sowie chemische Eigenschaften (KAK, pH, TC, TOC, C/N und elektrische Leitfähigkeit) analysiert. Es wurden mögliche, die Bodenqualität beeinflussende Umweltparameter definiert: (1) Bewässerungsdauer, (2) Deckung der Vegetation, (3) Drainageverhältnisse, (4) Qualität des Bewässerungswassers, (5) das Alter des Standorts und (6) die Höhenlage. Die Daten wurden statistisch ausgewertet über Korrelationsanalysen, Clusteranalyse und Ordinationsanalysen (CCA und RDA) unter Verwendung der R-Software.

Die Ergebnisse identifizierten drei Gruppen von Böden: Standorte älterer Oasengebiete, Standorte jüngerer Gebiete und Extremstandorte. Die erste Gruppe wird durch hohen Tonanteil und günstige Nährstoffverhältnisse charakterisiert. Die Bodentypen reichen von Hypersalic Solonchaks unter mangelhaften Drainagebedingungen, bis zu mächtigen Cambisols in höheren Lagen. Die jüngeren Oasenböden haben hohe Sandanteile und gute Drainagebedingungen, jedoch eine niedrige KAK. Die Extremstandorte sind unabhängig vom Alter des Oasenteils in tieferen Lagen mit höheren Grundwasserständen, ausgeprägter Salinität und geringer Vegetationsbedeckung zu finden. Eine Beobachtung der räumlichen und zeitlichen Veränderung von Vegetationsverlusten und Versalzung wäre für weiterführende Untersuchungen von Interesse.

Abstract

The Bahariya Oasis in the Western Desert of Egypt is characterized by traditional irrigation techniques and the date palm as the main cultivated plant. The older areas of the Oasis have been cultivated for several thousand years. Since 1952, through to the project “New Valley”, the agricultural production considerably increased by land reclamation in the desert. As a result of the irrigation of the new land by deep wells, the groundwater level partly decreased, most of the old wells dried up and parts of the old oasis fell into disuse. Another problem of irrigated farming in arid ecosystems is soil salinity, mainly caused by the negative water balance and a high potential evaporation, but often reinforced by lack of irrigation and poor drainage. This can lead to capillary rising of saline water and the precipitation of salts in the soil.

In this work, soil quality is investigated with the focus on soil salinity and plant productivity, using a Minimum Data Set of soil properties. For each site at least three soil samples were taken, mixed and analyzed on particle size distribution and chemical properties (CEC, pH, TC, TOC, C/N and electrical conductivity). Further, a collection of possible environmental factors, influencing soil quality, were defined: (1) quantity and frequency of irrigation, (2) shading by plants, (3) drainage conditions, (4) irrigation water quality (5) the age of the investigated area and (6) the altitude. The data was statistically evaluated by using basic statistic analysis, cluster analysis and multivariate data analysis (CCA and RDA) with the R-software.

The investigations identified similarities between the sites in older parts of the oasis, between the sites of the younger oasis and between extreme sites. The former group is characterized by a relative high percentage of clay and higher CEC. The soil types vary from Hypersalic Solonchaks under poor drainage conditions to deep Cambisols of good quality at higher altitudes. The younger oasis soils have high sand contents with good drainage conditions, but a lack of available nutrients. The extreme sites are found in lower lying parts of the oasis, regardless of their age, with high groundwater tables, very pronounced salinity and a sparse cover of vegetation. One point of interest for further investigations would be a comparison of natural and artificial drainage systems, the use of highly saline irrigation water and the spatial change of vegetation cover and salinity over a longer time period.

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projektseminars aus Geoökologie *Agrarökologische Untersuchungen in der Oase Bahariya, Ägypten*, am Institut für Geographie der Universität Wien unter der Leitung von Univ.-Prof. Mag. Dr. Cyrus Samimi. Die ökologischen Untersuchungen wurden von Ende März bis Anfang April 2010 mit tatkräftiger Unterstützung von Studierenden der Geographie der Universitäten Wien und Erlangen durchgeführt, sowie mit Hilfe von Dr. Baraa El Saied und Mahmoud Abdel Rahman.

1.1 Bedeutung der Oasenwirtschaft in Ägypten

Die Oase Bahariya im ägyptischen Teil der Libyschen Wüste, der sog. „Westlichen Wüste“, gehört zu den ältesten Bewässerungsgebieten der Welt. Es gibt Hinweise auf Rinderhaltung und der Anlage von Getreidespeichern in den Oasen der Westlichen Wüste aus der Zeit vor 11.000 Jahren. Man geht davon aus, dass damals der Übergang von einer Kultur der Jäger und Sammler zu jener der Ackerbauern stattfand (IBRAHIM, 2006). Seit 6.500 Jahren wird im Niltal die wichtigste Kulturpflanze der Ägypter, die Dattelpalme (*Phoenix dactylifera*), angebaut, was in etwa auch für die Oasen der Westlichen Wüste gilt. Die agrarwirtschaftlich bedeutendsten Bewässerungsgebiete Ägyptens befinden sich jedoch im Niltal, nur ca. 1.4 % der Agrarproduktion des Landes kommt aus den Oasen der Westlichen Wüste (IBRAHIM, 2006). Seit der Regierungszeit Präsident Nassers (1952-1970) gewannen die bewässerten Wüstengebiete jedoch an Bedeutung, da intensive Bemühungen in die Steigerung der Agrarproduktion Ägyptens gelegt wurden. Mehr als zwei Mio. ha Ackerland sollten ab 1958 durch das Projekt „Neues Tal“ in den Oasen El-Bahariya, El-Farafra, Ed-Dakhla und El-Kharga gewonnen werden (IBRAHIM, 2006).

1.2 Problematik der Oasenwirtschaft und jüngste Entwicklungen

In der Jahrtausende alten Tradition des Oasenbaus versuchte man immer wieder, durch ausgeklügelte Brunnen- und Bewässerungsanlagen, gut abgestimmte Fruchtfolgen und einer genauen Regelung der Wasserrechte, die widrigen natürlichen Bedingungen zu überwinden.

Trotz aller Maßnahmen bleibt die Oasenwirtschaft in einem der heißesten und trockensten Gebiete der Erde eine problematische Form der Landwirtschaft. Die grundlegenden Schwierigkeiten des Bewässerungslandbaus in den Oasen arider Gebiete sind u. a.

- die negative klimatische Wasserbilanz: die potenzielle jährliche Verdunstung ist größer als der jährliche Niederschlag
- Wassermangel und Abhängigkeit von Grundwasserquellen
- oftmals unzureichende Drainage
- Verwendung salzhaltigen Bewässerungswassers
- Salzanreicherung im Boden
- Desertifikation¹

Nach Mensching wird auch Bodenversalzung zu Desertifikationserscheinungen gezählt, und als entscheidender Indikator die Absenkung der Tiefenaquifere durch übermäßige Wasserentnahme angegeben (PFEIFER 1999, nach MENSCHING 1990).

Diese Probleme wurden durch das Projekt „Neues Tal“ zum Teil verstärkt. So gingen seit Projektbeginn infolge von Versalzung, Trockenfallen der alten Quellen oder Desertifikation insgesamt 7.000 ha Ackerland in der Westlichen Wüste verloren (IBRAHIM 2006).

Das Projekt „Neues Tal“ wurde u. a. mit der Vorstellung propagiert, unter der Libyschen Wüste läge ein großer Süßwasser-See, das Grundwasser, dessen Quellen unerschöpflich wären. Es wurden zahlreiche Tiefbohrungen unternommen, um an tiefer gelegene Grundwasserreserven zu gelangen. Die Fördermenge des Grundwassers hat sich seit den 1960ern verdoppelt und beträgt heute ca. 800 Mio. m³ pro Jahr. Die gesamte Grundwassermenge im Nubischen Aquifersystem beträgt nach Schätzungen 150.000 km³, was in etwa einem Nilabfluss von 1.800 Jahren entspricht. Die Grundwasserneubildungsrate in diesem Gebiet ist jedoch wegen des ariden Klimas verschwindend gering, weshalb dieses Grundwasser als nicht erneuerbare Ressource gilt, und bei einer Entnahme von 1,5 m³ pro Jahr innerhalb von 50 Jahren aufgebraucht wäre (IBRAHIM 2006).

¹ PFEIFER (1999) spricht im Zusammenhang mit dem immer trockener werdenden Klima der Sahara seit 7.000 - 4.000 B. P. von „klimatischer Desertifikation“ (nach FRANKENBERG 1979), oder auch Desertation, da der Begriff Desertifikation die anthropogen verursachte Degradation meint (nach MENSCHING 1979, 1980, 1990).

Insgesamt wurden 378.000 ha Neuland erschlossen, von denen heute jedoch lediglich 210.000 ha landwirtschaftlich genutzt werden. Davon erreichte nur die Hälfte die produktive Phase. Die Produktivität des Neulandes wird lediglich auf ein Fünftel derjenigen des alten Bewässerungsgebiets im Niltal geschätzt (IBRAHIM 2006).

In der Oase Bahariya selbst wurden laut offiziellen Quellen bis zum Jahr 1978 nur 250 ha Neuland erschlossen und kultiviert, was in etwa der Größe des Teilgebiets *Quasaa* entspricht. Damit vergrößerte sich das Kulturland auf insgesamt 1950 ha. Im Gegensatz zu den Oasen Kharga und Dakhla mit 2.650 ha bzw. 4.950 ha kultiviertem Neuland, ist die Oase Bahariya damit scheinbar nur minimal vom Projekt „Neues Tal“ betroffen (UTZ 2005). Da die Oasen der Westlichen Wüste jedoch von denselben Grundwasserreserven leben, betreffen die potenziellen Folgen des Projekts alle Oasen, auch über die libysche Grenze hinweg. So fällt der Grundwasserspiegel bei der Entnahme rings um die Bohrstelle in Form eines Extraktionskegels ab. Dadurch muss immer tiefer gebohrt und immer mehr Energie aufgewendet werden, um Grundwasser zu fördern. Eine generelle Rentabilitätsgrenze der Hebung von Grundwasser für die Bewässerung liegt bei 100 m Tiefe, jedoch empfiehlt IBRAHIM (2006) für Ägypten, eine Tiefe von 50 m nicht zu überschreiten. Die Tiefe der von der Regierung neu gebohrten Brunnen im Untersuchungsgebiet beträgt jedoch bis zu 1.500 m (EL SAIED, persönliche Mitteilung, 03.2010).

1.3 Definitionen

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit betreffen die Qualität der Oasenböden und ihren möglichen Versalzungsgrad. Um die Hypothesen zu erarbeiten sind zunächst Begriffsdefinitionen notwendig, sowie die Identifizierung von Umweltfaktoren, welche auf die Böden einwirken.

1.3.1 Bodenqualität

Die Bewertung von Böden ist eine vieldiskutierte Fragestellung in der Bodenkunde. Ein Boden kann nicht prinzipiell von guter oder schlechter Qualität sein - es kommt darauf an, von welcher Nutzung die Rede ist. Die Ansprüche an den Boden variieren, je nachdem ob der Boden als Acker- oder Weidestandort, als ökologischer Lebensraum für Fauna und Flora im

Sinne der Nachhaltigkeit oder vielleicht als Deponiestandort genutzt wird. Wie die Bewertung eines Bodens vorgenommen wird, hängt außerdem vom betrachteten Maßstab ab. So ist für einen ägyptischen Bauer seine bewirtschaftete Ackerfläche von Bedeutung, während für nationale Politiker das gesamte Bewässerungsgebiet und dessen Potential für die ägyptische Bevölkerung maßgeblich sind (MAUSBACH & SEYBOLD 1997).

Eine einfache Definition von Bodenqualität nimmt KARLEN et al. (1997) vor: Bodenqualität ist demnach „*the capacity of soil to function*“, also die Fähigkeit des Bodens zu funktionieren. Eine erweiterte Definition von Bodenqualität bezieht bereits die erwähnten Bodenfunktionen mit ein: „*the capacity of a specific kind of soil to function, within natural or managed ecosystem boundaries, to sustain plant and animal productivity, maintain or enhance water and air quality, and support human health and habitation.*“ (KARLEN et al. 1997). Bodenqualität sollte demnach auf der Basis der Bodenfunktion evaluiert werden.

Um diese Evaluation vornehmen zu können, müssen zunächst die Fragen geklärt werden, wie der Boden funktioniert, und welche Indikatoren geeignet sind, diese Funktionen zu erfassen. Die Messwerte dieser Indikatoren können wiederum mit den für den jeweiligen Bodentyp, die klimatischen Bedingungen, die jeweilige Nutzung etc. üblichen bzw. erwünschten Werten verglichen werden. Bodenfunktionen werden in physikalische, chemische und biologische Eigenschaften und Prozesse eingeteilt (KARLEN 1997).

Nach diesem Muster sind in Tabelle 1 die für die Arbeit durchgeführten Erhebungen und die betroffenen Bodeneigenschaften und –prozesse zusammengestellt.

Tabelle 1: Ausgewählte Einflussfaktoren auf die Bodenqualität und die von ihnen betroffenen Bodeneigenschaften und -prozesse

Gemessene Faktoren und Operationen		Betroffene Bodeneigenschaften und -prozesse
physikalisch	Korngrößenverteilung / Bodenart	Pflanzenwurzeldichte, Biologische Aktivität,
	Dichte (Dichte = $M / 100 \text{ cm}^3$)	Lagerungsdichte, Porenraum bzw. (nutzbare) Feldkapazität, pH-Kurve
	Wurzeldichte und -tiefe	Bodendichte, Infiltrationsvermögen, Wasserhaushalt
	Bodenmächtigkeit	Produktivitätspotenzial für Kulturpflanzen
chemisch	pH-Wert (potentielle und aktuelle Bodenacidität)	Verfügbarkeit von Nährstoffen, Toxizität von Schwermetallen, Absorption und Mobilität von Pestiziden, Humusabbau, Bodengefüge
	elektrische Leitfähigkeit (abgeleitet: Gesamtsalzgehalt)	Wasserinfiltration, Pflanzenwachstum, Bodenstruktur
	Gesamtstickstoff (N)	C/N-Verhältnis, N-Verfügbarkeit, Abbau org. Substanz, Humifizierungsgrad
	Gesamtkohlenstoff (TC)	
	organisch gebundener Kohlenstoff (TOC)	mikrobielles katalytisches Potenzial für C und N, Wasserhaltekapazität
	abgeleitet: anorganischer Kohlenstoff (TIC = TC - TOC)	Bodenstruktur
	abgeleitet: Kalziumkarbonat ($\text{CaCO}_3 = \text{TIC} * 100 / 12$)	Bodenstruktur, Ton-Humus-Komplexierung
	austauschbare Kationen (abgeleitet: KAK, Basensättigung)	Kapazität zur Förderung des Pflanzenwachstums, Bodenfruchtbarkeit, Umweltgefährdung, Puffereffekt gegenüber chemischer Veränderungen
biologisch	organisch gebundener Kohlenstoff (TOC)	mikrobielles katalytisches Potenzial für C und N, Wasserhaltekapazität
	abgeleitet: tote organische Substanz (Humus = TOC * 1.72)	Bodenfruchtbarkeit, Stabilität

verändert nach KARLEN et al. 1997, und MAUSBACH & SEYBOLD 1997

Die Interpretation der Indikatoren erfolgt entweder nach Wertebereichen, welche das volle Potenzial der Bodenfunktionen widerspiegeln, oder nach einer Punkteskala, beispielsweise (1) *more is better*, (2) *less is better*, (3) *optimum value* (MAUSBACH & SEYBOLD 1997 nach KARLEN 1994). Da für landwirtschaftlich genutzte Böden in den ägyptischen Oasen nur wenige Vergleichswerte existieren, wurde in dieser Arbeit je nach verfügbarer Information entweder auf die erste oder zweite Methode zurückgegriffen.

1.3.2 Bodensalzgehalt

Unter ariden Bedingungen kann es, je nach geologischem Untergrund, zu natürlicher Salzanreicherung durch kapillaren Aufstieg kommen. Salzhaltiges Grundwasser wird durch den Kapillardruck gehoben. In Folge der hohen potenziellen Verdunstung kommt es zur Ausfällung der Salze im Boden oder an der Bodenoberfläche. Oft handelt sich es jedoch um eine sekundäre oder künstliche Versalzung, die durch den Menschen herbeigeführt wird. Durch die Verwendung salzhaltigen Bewässerungswassers und mangelhafter Drainage in Kombination mit zu hohen Wassergaben wird der Prozess der Salzanreicherung ausgelöst. Hohe Wassergaben sind jedoch unerlässlich, um die Salze auszuwaschen, weshalb eine gute Drainage wichtig ist. Bei schluffig-lehmigen Böden ist bereits ein Grundwasserspiegel von zwei bis drei Metern unter der Bodenoberkante kritisch (BERNHARDT und BRETSCHNEIDER 1982).

Nach Auswaschung der Natriumsalze bleibt an den Austauschern ein hoher Na-Anteil, was zu einer Erhöhung des pH-Werts (Alkalisierung) und zu einer Verschlämmung der Böden führt; es bilden sich Natriumböden (Solonetze) mit für den Pflanzenwuchs ungünstigen Bodeneigenschaften (BLUME et al. 2010).

Die Einflussfaktoren auf Bodensalzgehalt sind in Tabelle 2 zusammengefasst:

Tabelle 2: Ausgewählte Einflussfaktoren auf den Bodensalzgehalt und ihre Auswirkungen

	Einflussfaktor	Auswirkung auf den Salzgehalt
Vegetation	Deckung	verringert die potenzielle Verdunstung
	Wasserbedarf	Salzauswaschung bei intensiverer Bewässerung
	Wurzeldichte und -tiefe	erhöht die Permeabilität des Bodens
	Salzverträglichkeit	Halophyten können dem Boden Salz entziehen
Boden	Textur / Porengröße	je höher der Sandanteil (Groporen) desto höher die Permeabilität
	Tongehalt	verstärkt die Kapillarität und kann zu höher gelegenen Ausfällungshorizonten führen
	Kapillarität	niedriger Kapillardruck verhindert den Aufstieg salzhaltigen Wassers
Niederschlag bzw. Bewässerung	Salinität	Salzzufuhr durch das Bewässerungswasser
	Menge	hohe Wassergaben führen i.a. zur Salzauswaschung, jedoch nur bei guter Drainage
Grundwasser	Grundwasserhöhe	ein hoher Grundwasserspiegel begünstigt die kapillare Hebung
	Salinität	Salzzufuhr durch das Grundwasser
Drainagenetz	Dichte / Zustand	eine ausreichende Zahl an Drainagekanälen beschleunigen die Abfuhr des Abwassers
	Geländeneigung und -höhe	stärkere Neigung begünstigt den Abfluss, niedrig gelegene Areale akkumulieren Feuchtigkeit, Nährstoffe (und Salze), und org. Substanz

Zusammenstellung aus PFEIFER 1999; BLUME et.al. 2004 und USDA 2011a

1.4 Zielsetzungen und Hypothesen der Arbeit

Wie eingangs geschildert, unterliegt die Oase Bahariya einem Wandlungsprozess, der das Brachfallen bzw. Versalzen potentiell ertragreicher Anbauflächen zur Folge hat. Über diese Entwicklung und deren Auswirkung wurden keine aktuellen Studien gefunden. Um diesen Wandlungsprozess zu erfassen, müssten langjährige Untersuchungen durchgeführt werden und Auswertungen älterer und jüngerer Fernerkundungsdaten vorgenommen werden. Dies würde den Rahmen einer Diplomarbeit überschreiten - es handelt sich daher um eine Momentaufnahme.

- Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Erfassung der Bodenqualität ausgewählter Standorte in der Oase Bahariya. Insbesondere soll auf das Problem der Versalzung näher eingegangen werden.

- Der bodenkundliche Zustand dieser Auswahlstandorte soll dargestellt werden, und mithilfe repräsentativer Bodenprofile soll eine Aussage über den Gesamtzustand der Oasenböden getroffen werden. Dabei werden sowohl ältere als auch jüngere Anbauflächen miteinander verglichen.
- Die weiteren Ziele der Arbeit sind die Erhebung möglichst vieler auf die Bodenqualität bzw. -versalzung einfließender Faktoren, und deren Untersuchung auf die Stärke ihres Einflusses.

Es ist zu erwarten, dass die Salinität der Böden geringer ist, je niedriger die Verdunstung, je intensiver die Bewässerung und je besser die Drainage ist. Die Einflussfaktoren auf Bodenqualität und -salzgehalt wurden in den Tabellen 1 und 2 dargestellt. Es ist davon auszugehen, dass noch weitere Faktoren eine relevante Rolle spielen. In der vorliegenden Arbeit konnten nicht alle dieser Einflussfaktoren quantitativ erhoben werden, wie beispielsweise der Grundwasserstand.

Damit ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie ist die Qualität der Böden in der Oase Bahariya hinsichtlich ihrer landwirtschaftlichen Nutzung?
- Welche Faktoren bestimmen die Bodenqualität bzw. den Salzgehalt der Böden?
- Welche Faktoren haben einen stärkeren, welche einen schwächeren Einfluss?

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Geographische Lage

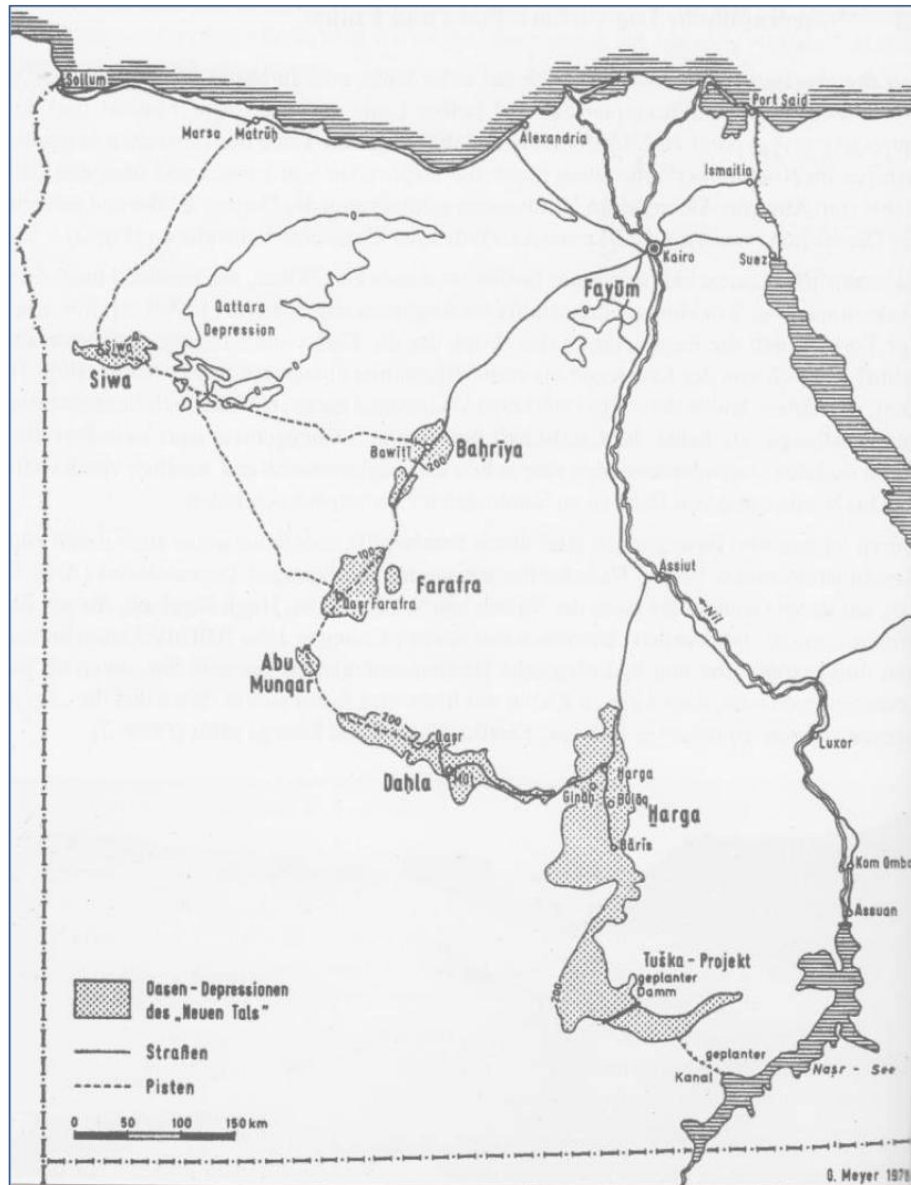


Abbildung 1: Die Lage Bahariyas und anderer Oasen der Westlichen Wüste Ägyptens
Quelle: BLISS 2006, nach MAYER 1979

Die Oase Bahariya (ägypt. *al-Baḥariyya*) ist eine von mehreren Oasen im ägyptischen Teil der Libyschen Wüste, der sog. „Westlichen Wüste“ der Sahara (siehe Abbildung 1). Sie befindet sich rund 300 km südwestlich von Kairo in einem geologischen Becken. Ursprünglich war Bahariya Teil des 1958 unter Präsident Nasser gebildeten Gouvernements *Al-Wadi al-dschadid*, was in etwa „Neues Tal“ bedeutet, und mit dem gleichnamigen groß angelegten

Landgewinnungs-Projekt in Verbindung steht. 1968 fiel Bahariya dem Gouvernement *al-Dschīza* oder auch *el-Gīza* zu.

Die Oase ist über die einzige Verbindungsstraße Al-Wahat – El-Bahariya – El-Gizeh erreichbar. In *Bawiti*, der größten Stadt der Oase, teilt sich die Straße in eine Verbindung Richtung NW zur ca. 300 km entfernt gelegenen Oase *Siwa*, und eine Straße Richtung SO, die in weiterer Folge die Oasen des „Neuen Tals“ *Farafra*, *Dakhla* und *Kharga* verbindet, und letztendlich ins Niltal führt.

Nach BLISS (2006) betrug die Bevölkerungszahl Bahariyas um die Jahrtausendwende laut Stadtverwaltung 30.000 Menschen, davon lebten 6.000 bis 8.000 in Bawiti. Jedoch sind in dieser Quelle für das Jahr 1981 nur 16.750 Einwohner angegeben, was einen Bevölkerungsanstieg um fast das Doppelte innerhalb von 20 Jahren bedeuten würde. Zwar steigt die Bevölkerung Ägyptens stark an und der Anteil der Landbevölkerung blieb seit 1980 konstant (MÜLLER-MAHN 2001). Ob aber tatsächlich innerhalb von 20 Jahren etwa 14.000 Menschen in die Oase übersiedelt wurden bleibt fraglich.

Die Oase liegt am nordöstlichen Rand einer Depression mit der Größe von 1.800 km². Das Bewässerungsgebiet selbst umfasst 1.950 ha (UTZ 2005). Die Oase kann in vier Teilgebiete gegliedert werden, die im Folgenden als die Oasenteile *Quasaa*, *Mamour*, *Zabu* und *Bawiti* bezeichnet werden (siehe Abbildung 2). Für die Lage der Aufnahmen siehe Anhang 1.

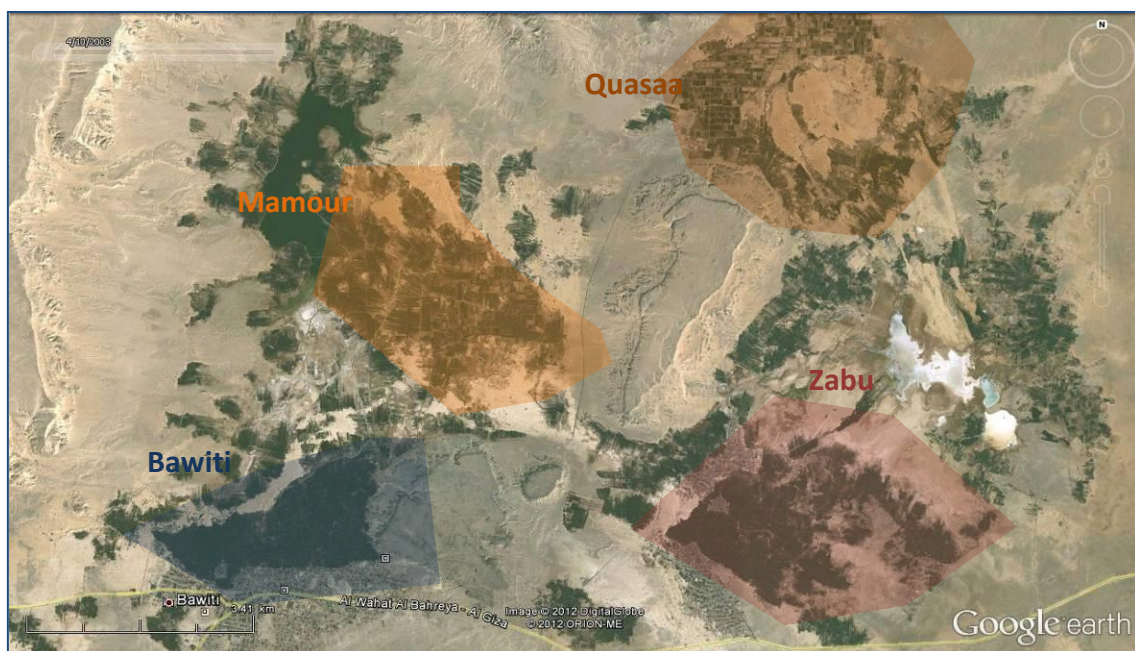


Abbildung 2: Die Teilgebiete der Oase Bahariya
Quelle: Google Earth 2011, Bildaufnahmedatum 10.04.2003 (bearbeitet)

2.2 Klima und natürliche Vegetation der Sahara

Das Klima im Umkreis der Oase Bahariya zählt zum vollariden Klima der Sahara. Die Oase befindet sich im Kernbereich der Vollwüste und wird damit von keinem Regenregime erreicht, mit Ausnahme von episodischen Niederschlagsereignissen (LAUER & BENDIX 2004). Nach PENCK, der 1910 erstmals den Klimaparameter Verdunstung in eine Klimaklassifikation einbrachte, ist Aridität durch $N < V$ definiert (LAUER & BENDIX 2004 nach PENCK 1910). Das bedeutet, es fällt weniger Niederschlag als potenziell verdunstet werden kann. Im Klimadiagramm der Station Bahariya wird dies deutlich – es fallen jährlich nur 4 mm Niederschlag im Durchschnitt (siehe Abbildung 3²):

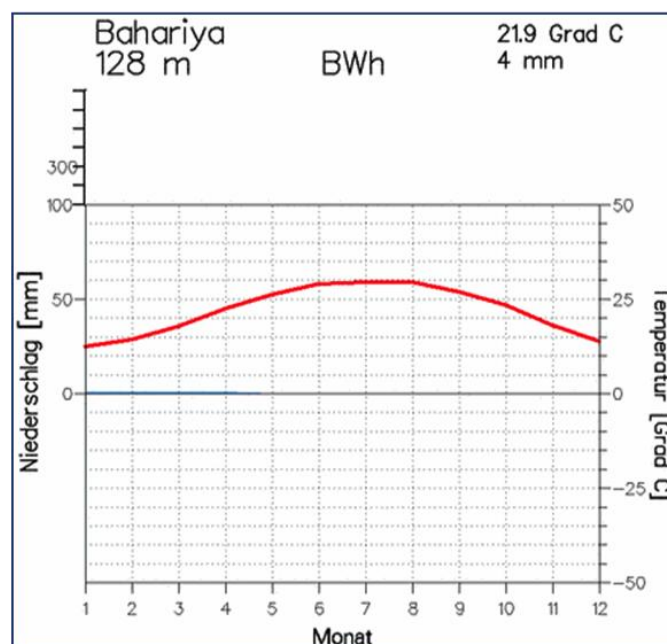


Abbildung 3: Klimadiagramm nach Walter für die Station Bahariya
Quelle: www.klimadiagramme.de

Zusätzlich zur außergewöhnlichen Trockenheit ist das Klima der Sahara durch hohe Temperaturunterschiede im Tagesverlauf gekennzeichnet. Das Temperaturmaximum kann über 50°C liegen (beispielsweise Kharga: 50,3°C), das Temperaturminimum mehrere Grade unter 0°C, z.B. in Dakhla mit -4,0°C (DEUTSCHER WETTERDIENST 2007). Im ansonsten ariden Klima Nordafrikas stellt das Oasenklima jedoch eine Besonderheit dar, der das nächste Kapitel gewidmet ist.

² Die Temperaturkurve (rot) zeigt die durchschnittlichen Monatsmittel für den Zeitraum von 1961-1990. Die schmale blaue Fläche von den Monaten Jänner bis April stellt die Niederschlagsmengen dar.

Die Wüstenflora ist durch Anpassung an die extremen klimatischen Bedingungen charakterisiert, zum Beispiel durch die Ausbildung kleiner, ledriger Blätter oder Dornen. Nur an günstigen Standorten, wie Senken mit oberflächennahem Grundwasser oder durch episodische Niederschläge, kann es im vollariden Klima zu natürlicher Vegetation kommen. Diese bilden Akazien, Kameldorn, Dumapalmen oder die *Balanites aegyptiaca*, deren Früchte als Nahrung und Medizin dienen (IBRAHIM 2006).

2.3 Geologie und Geomorphologie

Das Bahariya-Becken ist eines von sieben Oasenbecken der Westlichen Wüste. Es unterscheidet sich von den anderen dadurch, dass es komplett von Steilhängen umgeben ist und nicht an einer oder mehreren Seiten geöffnet ist. Es befindet sich eine große Zahl an isolierten Hügeln und Inselbergen im Becken. Die Lage des Beckens innerhalb der geologischen Gesamtsituation Ägyptens ist in Abbildung 4 dargestellt.

Das Gebiet der Westlichen Wüste kann in drei Zonen gegliedert werden: (1) das nördliche Quattara-Becken mit der Oase Siwa, das landwirtschaftlich von geringer Bedeutung ist, da hier das Grundwasser salzhaltig ist, (2) das Ed-Dakhla Becken im Süden, welches durch die Bahariya-Kairo-Hebungsachse (in Abbildung 4 als geologische Störungszone eingezeichnet) vom Norden getrennt wird, und (3) das Aswan-Plateau östlich der Kharga-Schwelle (IBRAHIM 2006).

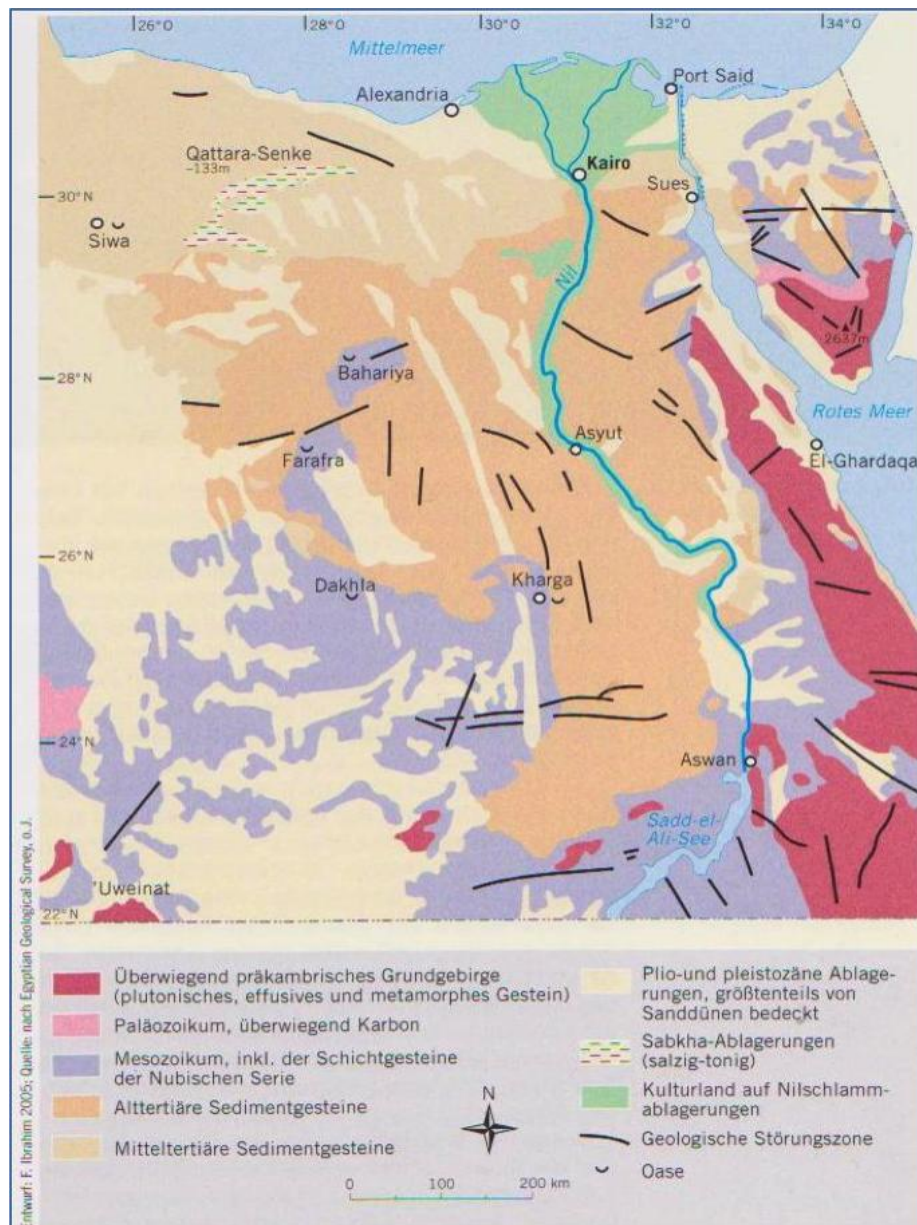


Abbildung 4: Geologische Übersichtskarte Ägyptens

Quelle: IBRAHIM 2006, nach Egyptian Geological Survey o. J.

Der für das Untersuchungsgebiet wichtigste geologische Zeitabschnitt begann mit dem Zerfall des Gondwana-Kontinents während der Jura-Zeit. Damals existierten ein instabiles Schelf im nördlichen Teil Ägyptens und ein stabiles Schelf im Süden. Durch tektonische Aktivitäten kam es zu Hebungen und Auffaltungen in NO-SW-Richtung, die auch zur Bildung der Bahariya-Kairo-Schwelle führten. Durch die weiteren tektonischen Aktivitäten während der Kreidezeit wurde das Ed-Dakhla Becken gebildet (SCHLÜTER 2006). Während des Mesozoikums, von Oberjura bis zum Tertiär, fanden immer wieder Meeresintrusionen statt, deren Ablagerungen die älteren marinen und jüngeren kontinentalen Sedimente bilden. Diese Sedimente, auch Nubische Serie oder Nubischer Sandstein genannt, sind bis zu 4.000

m mächtig und dünnen Richtung Süden aus (IBRAHIM 2006). Sie reichen über weite Teile Nordafrikas bis nach Algerien. Die Nubische Serie besteht zum einen aus Sandsteinen, die durch fluviale Systeme abgelagert wurden, und zum anderen aus marinen phosphatischen und karbonatischen Ablagerungen (SCHLÜTER 2006). Sie stellen das für die Bewässerung der Oasen bedeutende „Nubische Aquifersystem“ dar, auf das im folgenden Kapitel näher eingegangen wird.

Im Nordwesten der Oase Bahariya befinden sich große Eisenerzlagerstätten, die im letzten Jahrhundert zum Großteil ausgebeutet worden waren. Das abgebaute Eisenerz wurde zu den Stahlfabriken in Helwan bei Kairo transportiert. Aus dieser Zeit stammt die Eisenbahnstrecke Bahariya-Helwan, die heute nicht mehr in Betrieb ist (SCHLÜTER 2006). Zwischen Bahariya und Farafra liegt die „Weiße Wüste“, die für interessante Formationen weißer Kalksteinmonolithen bekannt ist (Abbildung 5). Sie wurde 2002 zum Naturschutzgebiet erklärt und ist ein Hauptziel des Wüstentourismus (IBRAHIM 2006).



Abbildung 5: Kalksteinmonolithen in der Weißen Wüste
Foto: Mayer (2010)

2.4 Hydrogeologie

Das Nubische Aquifersystem ist ein kompliziertes Grundwassersystem, das sich auf etwa 2 Mio. km² über Ägypten, dem Sudan, Libyen und dem Tschad erstreckt. Dieses fossile Grundwasser ist schätzungsweise 20.000 Jahre alt und wurde bis heute nur in geringem Maße ergänzt, da seit dem Miozän, 23.000 Jahre vor heute, aride Bedingungen in Nordafrika herrschen (SCHLÜTER 2006). Das geschätzte Grundwasservorkommen im gesamten Nubischen Aquifersystem beläuft sich auf 150.000 km³, wovon heute in etwa 0,8 km³ pro Jahr entnommen werden, was mehr als der doppelten Menge des vor 1960 geförderten Wasser entspricht (IBRAHIM 2006). Seit dem Beginn des Projektes „Neues Tal“ wurden

zahlreiche Untersuchungen zur geologischen und hydrogeologischen Situation der Westlichen Wüste durchgeführt. Dabei wurde unter anderem festgestellt, dass eine Grundwassererneuerung über die Zufuhr anderer Grundwässer erfolgt, jedoch in einem wesentlich geringeren Ausmaß als die Entnahme und Aussickerung, wodurch das Nubische Aquifer ein „unloading system“ darstellt (THORWEIHE 1990).

Die Durchlässigkeit der verschiedenen geologischen Lagen in der Oase Bahariya zeigt Abbildung 6. Die jüngsten Ablagerungen sind tonhaltig und stammen aus der Oberkreide und dem Tertiär. Sie weisen eine hohe Wasserspeicherkapazität auf. Darunter befinden sich die sandigeren und wasserdurchlässigeren Ablagerungen aus der Kreidezeit, die auf einer etwas weniger durchlässigen Gesteinsschicht aus dem Paläozoikum liegen.

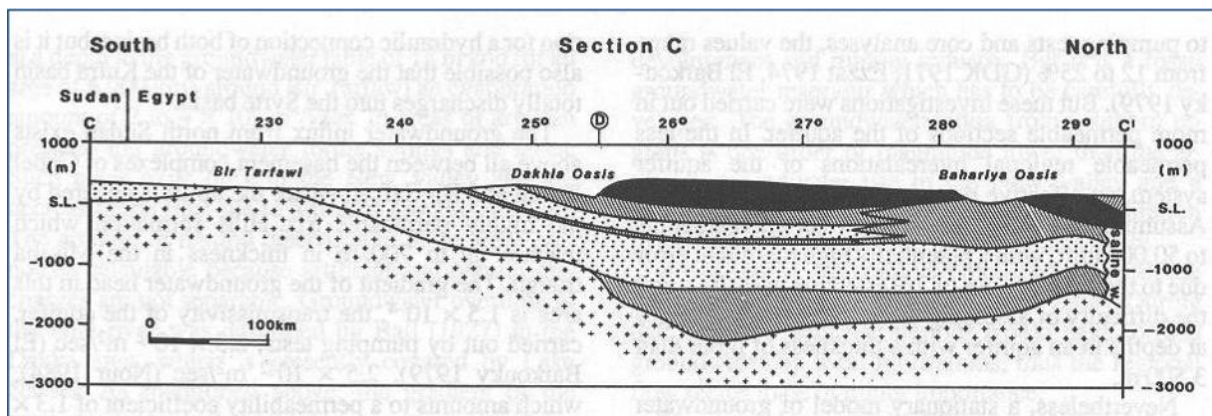


Abbildung 6: Gesteinslagen unterhalb der Oasen Dakhla und Bahariya. Weniger durchlässige Lagen sind stärker schraffiert.
Quelle: THORWEIHE & HEINL 1990

Im Norden angrenzend, also über dem 29. Breitengrad, befindet sich die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser, was in Abbildung 7 verdeutlicht wird. Diese Salzwasserfront bewegt sich zwischen 100 m/a und 250 m/a landeinwärts, wodurch die Gefahr der Salzwasserintrusion in das Grundwasserreservoir des Dakhla-Beckens besteht. Diese Gefahr wird durch große Fördermengen verstärkt. So würde eine Steigerung der Grundwasserentnahme auf 5 km³/a, wie Pläne der ägyptischen Regierung vorsehen, zur Bildung von Absenkungstrichtern in der Umgebung der Förderbrunnen führen. Das hätte eine Vereinigung der Absenkungstrichter der Oasen des Quattara-Beckens und derjenigen des Dakhla-Beckens zur Folge, und könnte ein Fallen der Grundwasserdruckfläche um 150 m verursachen (JUNGER 2001). Nach THORWEIHE & HEINL (1999) kann nur eine Grundwassererschließung in wenigen ausgewählten Gebieten der Westlichen Wüste eine langfristige Wasserverfügbarkeit gewährleisten.

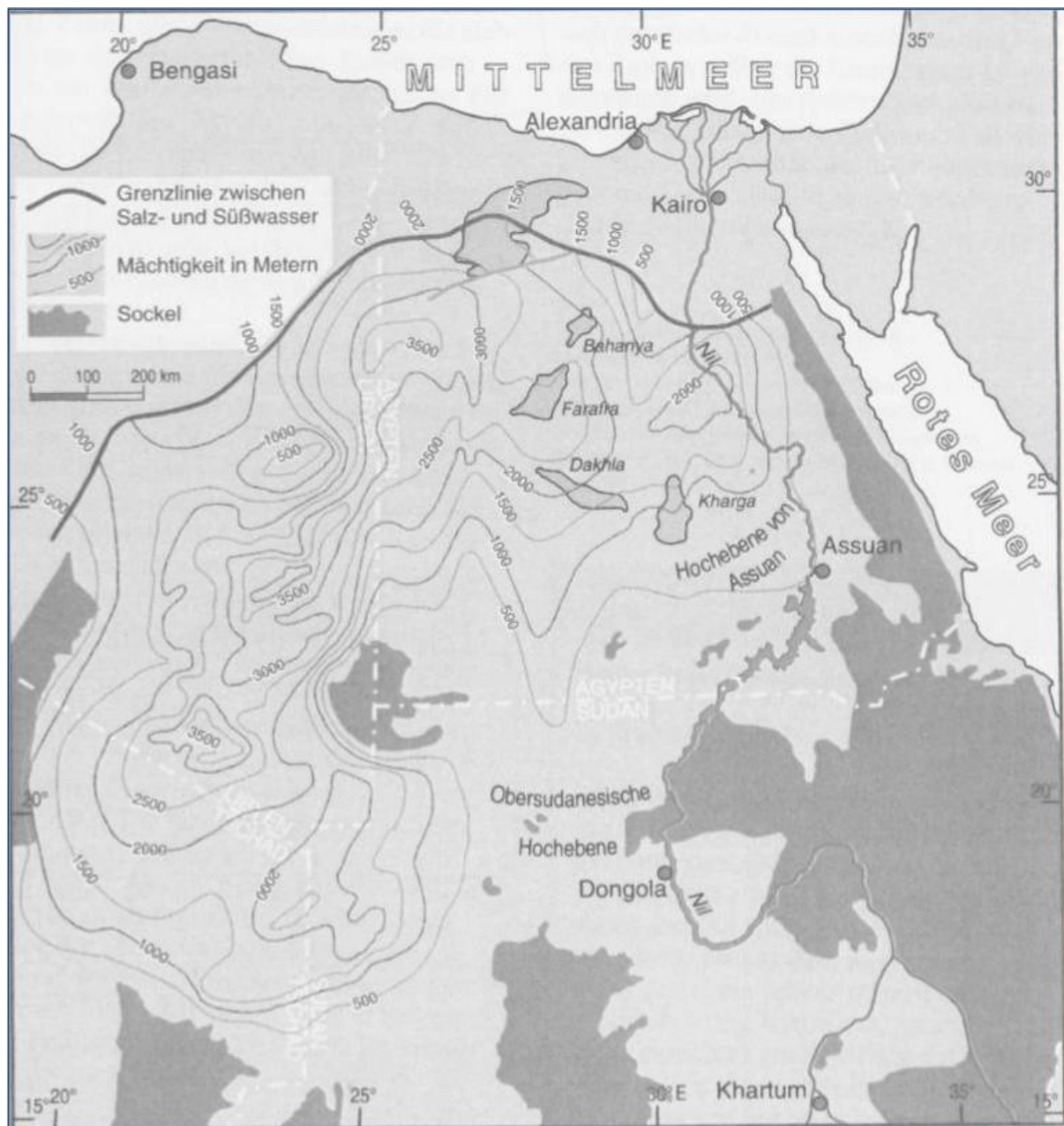


Abbildung 7: Verteilung und Mächtigkeit der Grundwasserreserven der Libyschen Wüste
 Quelle: JUNGFER 2001, verändert nach THORWEIHE UND HEINL 1998

3. Oasenwirtschaft

Oasen sind vom Menschen künstlich geschaffene Ökosysteme mit besonderen Charakteristika, die aus dem Zusammenspiel von Bewässerung und Kultivierung entstanden sind, und daher separat von den Umweltbedingungen der Sahara beschrieben werden müssen.

Eine enge Definition des Begriffs „Oase“ wurde von SCHIFFERS 1970 formuliert. Demnach ist eine Oase *„...die inselhafte Lage eines auf Bewässerung basierenden Gebietes inmitten eines ungenutzten semi- bis vollariden Steppen- oder Wüstengebietes mit hoher Anbauintensität in bis zu drei Stockwerken mit Dominanz der Dattelpalme und der Verbreitung im islamischen „Orient“ von Süd-Marokko bis ins westliche Xinjiang in China“* (PFEIFER 1999, nach SCHIFFERS 1970). Diese Definition trifft zwar exakt auf das Untersuchungsgebiet zu, grenzt aber Oasen aus, die nicht innerhalb dieses geographischen Raums liegen. So existieren Oasen in Südamerika und den USA, und auch zahlreiche Oasen, in welchen die Dattelpalme aufgrund der zu großen Höhenlage nicht die Leitkulturpflanze darstellt (PFEIFER 1999). Dennoch sind in der Definition von SCHIFFERS schon einige wichtige Merkmale der Oasen enthalten, wie die künstliche Bewässerung, den Stockwerksbau, die Dattelpalme als wichtigste Kulturpflanze sowie die Verbindung von Oasenwirtschaft und islamischer Kultur, auf welche in diesem Kapitel näher eingegangen wird.

3.1 Klima

Die wichtigsten Charakteristika des mesoskaligen Oasenklimas sind die Einflüsse der Vegetationsbedeckung und der Bodenfeuchte. Der Begriff „Oaseneffekt“ wird bei SAARONI et al. (2004) als Veränderung der mikroklimatischen Gegebenheiten einer bewachsenen im Vergleich zu einer vegetationslosen Fläche beschrieben. Durch die dichte Vegetationsbedeckung kommt es zu einer erheblichen Reduktion der Sonneneinstrahlung und zu verminderten Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum Freiland. So betragen die Windgeschwindigkeiten bis zu einer Höhe von 5 m relativ konstante 1.2 m/s, während sie in 12 m Höhe bei maximal 5 m/s liegen und im Freiland bereits Maxima von 7 und 9 m/s erreichen (SELLAMI & SIFAOUÏ 1998). Durch die Bodenfeuchte der bewässerten Parzellen, den geringeren Windgeschwindigkeiten und der niedrigeren potenziellen Verdunstung durch

die vegetationsbedingte Abschattung der Sonneneinstrahlung, kommt es zu einer erhöhten Luftfeuchtigkeit im Bereich der Oase. Diese Faktoren (Abschattung, Windreduktion, niedrigere Verdunstung, höhere Luftfeuchtigkeit) führen zu einer Änderung des fühlbaren Wärmestroms und einer deutlichen Abflachung der Tagesamplitude des Temperaturverlaufs. Diese wird besonders in Bodennähe deutlich (PFEIFER 1999). So wurde von SELLAMI & SIFAOU (1998) bei Untersuchungen der Globalstrahlung in verschiedenen Stockwerken der Oase *Tozeur* in der tunesischen Sahara festgestellt, dass der Strahlungseinfall in Bodennähe weniger als die Hälfte des Strahlungseinfalls in einer Höhe von 12 m ausmacht (Abbildung 8).

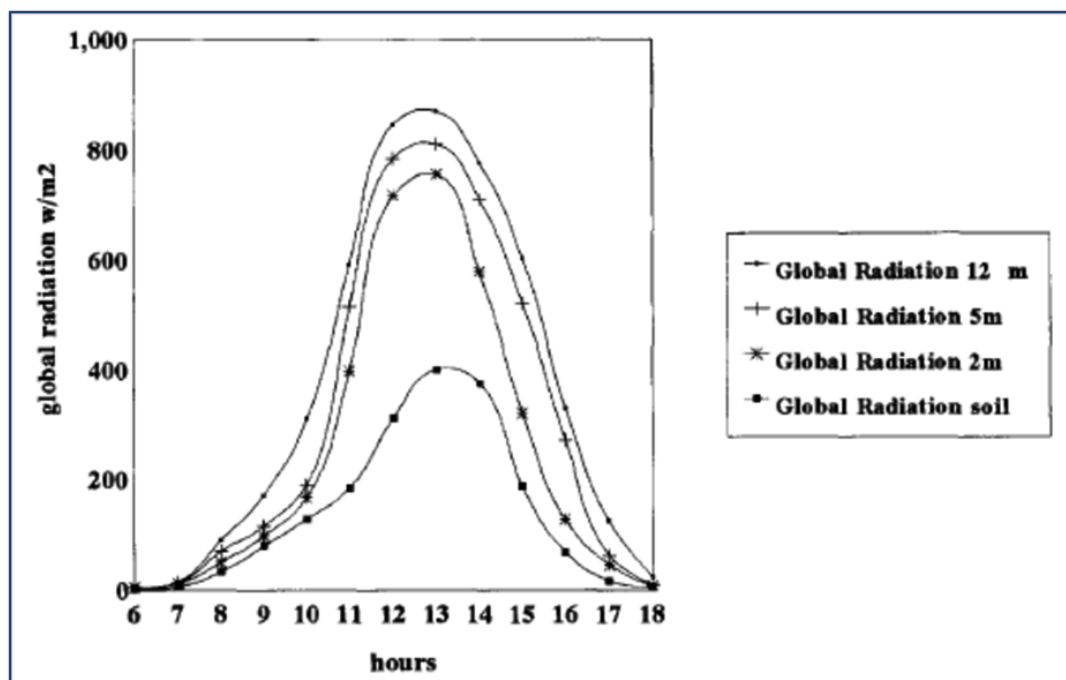


Abbildung 8: Tagesverlauf des Einfalls der Globalstrahlung innerhalb der Oase Tozeur
 Quelle: SELLAMI & SIFAOU 1998

Jedoch steigen Temperatur und relative Feuchte in den untersten 2 m um die Mittagszeit im Vergleich zur Temperatur in den Baumkronen der Dattelpalmen an. Dort wird die Strahlungsenergie bei der Erwärmung der Blattflächen und der Interzeption durch die Stomata verbraucht - erst in den frühen Abendstunden kühlt der Boden soweit aus, dass es zu einer Effekt-Umkehr kommt (SELLAMI & SIFAOU 1998). In der bodennahen Luftschicht betragen die minimalen Messwerte für relative Luftfeuchtigkeit in der Oase 40%, im Freiland hingegen nur 10%. Die Maxima treten während der nächtlichen Abkühlung auf, und betragen bis zu 90% innerhalb der Oase und höchstens 80% im Freiland. In einer Höhe von 2 Metern zeigen langfristige Messungen eine um 15% erhöhte relative Luftfeuchtigkeit in den Oasen im Vergleich zum Freiland. Messungen der potenziellen Verdunstung, also der

Verdunstungskraft, die unter den gegebenen atmosphärischen Bedingungen herrscht (RICHTER & SCHMIEDECKEN 1985), bestätigen den Oaseneffekt. So beträgt in 100 cm Höhe die potenzielle Verdunstung in der Oase nur etwa 40% derjenigen im Freiland (siehe Abbildung 9):

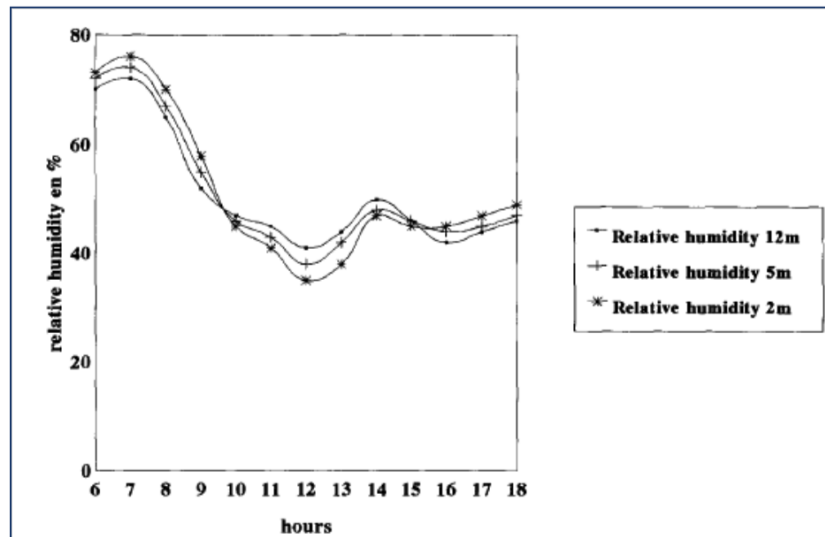


Abbildung 9: Tagesgang der relativen Feuchte in der Oase Tozeur (2, 5 und 12 m Höhe)

Quelle: RICHTER & SCHMIEDECKEN 1985

3.2 Böden

Nach BLUME et al. (2010) befindet sich das Untersuchungsgebiet in der Bodenzone der Vollwüste mit dem Vorkommen der Bodentypen Arenosol, Leptosol, Gypsisol und Solonchak. Charakteristika der Wüstenböden sind erhöhter Salz- und/oder Gipsgehalt mit einem Maximum im Unterboden, eine grob- bis mittelfeine Körnung und geringe Humusgehalte (IBRAHIM 2006).

Es kann weiter nach den Typen der Wärmewüsten eingegrenzt werden, wobei die Westliche Wüste zu den Seriren zählt, die aus aquatisch und äolisch entstandenen Lockersedimenten besteht und die Mehrzahl der Oasen beherbergt. Die Oasenböden des Untersuchungsgebietes sind von artesischem Grundwasser beeinflusst. Hier kommen Bodentypen wie Calcaric Cambisole, Gleyic Solonchake, Arenosole und Regosole vor. Für die Nutzung kommen vor allem sandige bis lehmsandige Böden in Frage, da die Gefahr der sekundären Salzanreicherung bei tonigen Böden in ariden Gebieten zu groß ist (BLUME et al. 2010).

Die Böden der Oasen zeigen oftmals hohe Na-Gehalte, die durch die Anreicherung von Na-Salzen entsteht, wie bei den Bodentypen Solonetz und Solonchak. Solche Böden haben hohe pH-Werte und weisen Nährstoffmängel auf, da Ca^{++} , Mg^{++} und K^+ eingetauscht werden (BLUME et al. 2010). Bei Auswaschung der Salze mit der Bewässerung kommt es auch zu einer Auswaschung der in Lösung befindlichen Nährstoffe - die hohe Na-Belegung der Austauscher führt letztendlich zu einer Verschlämmung und Dichtelagerung, sowie zu ungünstigem Luft- und Wasserhaushalt der Böden (BLUME et al. 2010). Oasenböden sind feinkörniger als die Böden der Vollwüste und das Salzmaximum liegt hier im Oberboden (BLUME et al. 2010). Dies gilt jedoch nur für nicht bewässerte Oasenböden, die von sekundärer Versalzung betroffen sind, wie Abbildung 10 veranschaulicht. Generell ist der A-Horizont humusarm, durch die hohe Verdunstung jedoch mit Mineralen und Nährstoffen angereichert - es findet durch die Auswaschung also keine Verlagerung der Nährstoffe in tiefere Lagen statt (PFEIFER 1999).

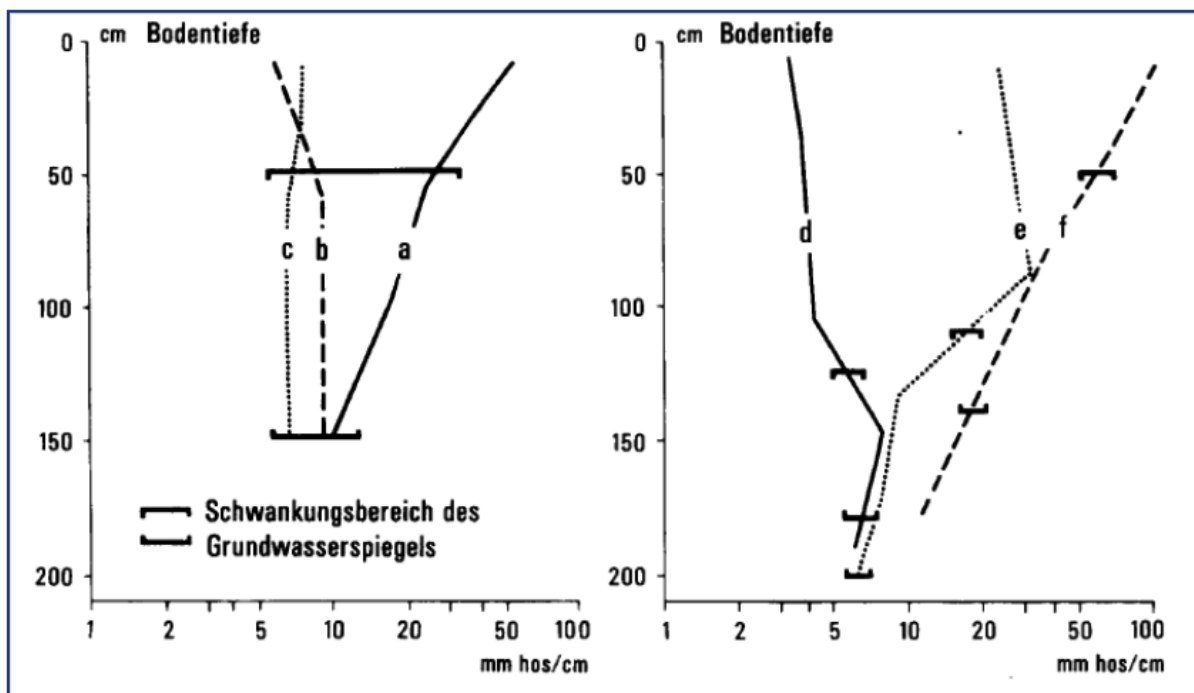


Abbildung 10: Salzgehalte in unterschiedlichen Bodentiefen. Links: a) Juli 1964, b) Juli 1965, c) Mai 1968. Nach Juli 1964 wurde der zu Beginn stark versalzte Boden mit ca. 1200mm/a bewässert (nach CRUES, 1968). Rechts: d) Boden eines mehrschichtigen Oasenbestandes (nach EL FEKIH 1969), e) Boden eines aufgegebenen Palmenhaines (nach BELKHODJA 1969), f) Boden am Rande des Chotts (nach EL FEKIH 1969).
 Quelle: RICHTER & SCHMIEDECKEN 1985

Ein typisches Bodenprofil des Untersuchungsgebietes ist in Abbildung 11 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Böden wird in Kapitel 5.3 vorgenommen.

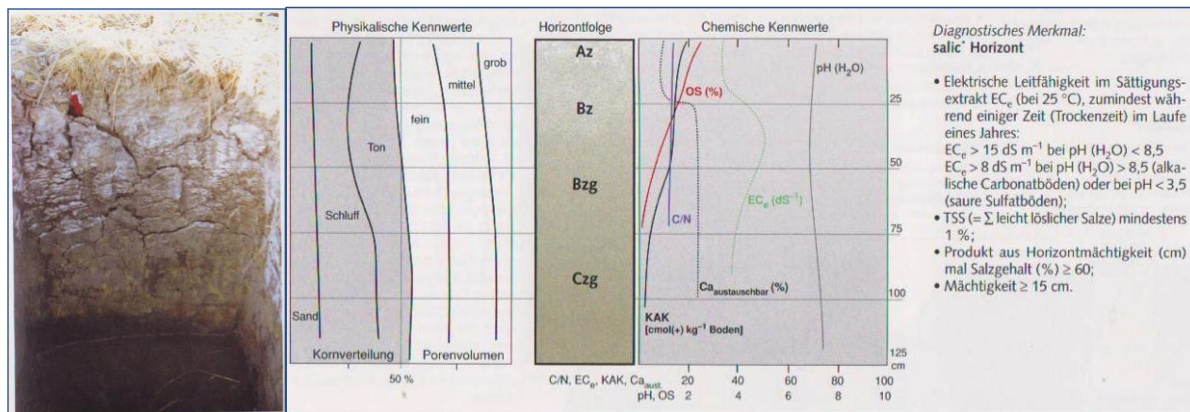


Abbildung 11: Links: charakteristisches Bodenprofil eines Solonchak (Senegal); rechts: ausgewählte Bodenkennwerte eines hypersodisch gleyic Solonchaks.

Quelle: ZECH & HINTERMAIER-ERHARD 2002

3.3 Bewässerung

3.3.1 Wassererschließung

Nach einer Typisierung nach Herkunft des Bewässerungswassers zählen die Oasen der Westlichen Wüste zu den Artesischen Grundwasseroasen (PFEIFER 1999). Das Bewässerungswasser wird aus artesischen Quellen aus bis zu 1.500 m Tiefe gewonnen (EL SAIED, persönliche Mitteilung, 03.2010). Die traditionelle Bewässerung wurde jedoch durch wesentlich flachere Brunnen ermöglicht, in welchen bis zum Anfang der 1980er Jahre das Wasser noch aus eigenem artesischem Druck an die Oberfläche trat. Diese Brunnen stammen zum Teil aus römischer Zeit oder wurden seit dem 19. Jh. mittels traditioneller Bohrtechnik errichtet³. Die in den letzten Jahrzehnten gebohrten Tiefbrunnen sind „Neue Brunnen“ (*abâr gedîd*) oder „Regierungsbrunnen“ (*abâr hûkumîyya*) (BLISS 2006). Wo artesische Horizonte bereits in Tiefen von 25 m auftreten, wurden in der Vergangenheit auch unterirdische Kanalsysteme, sogenannte *foggarât* angelegt. Diese wurden vermutlich in dynastischer und römischer Zeit durch Sklavenarbeit geschaffen, da ihre Anlage und Wartung sehr arbeitskraftintensiv sind. Seit alternative Lösungen zur Wassererschließung vorhanden sind, wurden die Arbeiten an den *foggarât* eingestellt und sie verfielen. (BLISS 2006).

³ Die römischen Brunnen oder jene unbekannten Ursprungs werden „römische Quelle“ (*`aîn rumân*) genannt. Brunnen aus dem 19. Jh. tragen meist den Namen desjenigen, der die Bohrung initiiert hat, oder sie werden *`bîr* genannt.



Abbildung 12: Brunnensysteme in Bahariya. Links: Sammelbecken eines traditionellen unterirdischen Kanalsystems (Foto: Hudribusch (2010)), Rechts: Auffangbecken eines Regierungsbrunnen (*abâr hukumiyya*) mit geöffnetem Schütz (Foto: Mayer (2010))

Durch die modernen Tiefbohrungen sank die Grundwasserdruckfläche erheblich ab, wodurch sowohl in alten als auch in neuen Brunnen nur mehr mittels Pumpbetrieb Wasser gefördert werden kann. Ein großer Teil der alten Quellen ist mittlerweile zur Gänze trockengefallen und die traditionell private Wassererschließung findet kaum mehr statt. Die noch vorhandenen alten Brunnen haben eine sehr geringe Schüttung im Vergleich zu den Regierungsbrunnen. Sie variiert zwischen 20 m³/Tag und 30 m³/Tag, während Tiefbrunnen eine Schüttung von 1.500 m³/Tag bis 5.000 m³/Tag aufweisen (BLISS 2006). Messungen im Rahmen dieser Arbeit ergaben bei Flachbrunnen bis zu 80 m³/Tag, bei Tiefbrunnen bis zu 8.000 m³/Tag. Die Schüttung der Tiefbrunnen reduzierte sich jedoch seit den Bohrungen ab den 1960er Jahren erheblich, sie haben heute nur noch 30% bis 57% ihrer anfänglichen Schüttung (BLISS 2006).

3.3.2 Bewässerungsverfahren

Traditionell wird in allen Oasen der Westlichen Wüste das Wasser über Gravitation zu den Feldern geführt, dort werden die Kanäle geöffnet und die Felder mittels Flächenüberstau bewässert. Es existieren nur wenige Kreisberegnungsanlagen außerhalb der alten Oasen und vereinzelt Tröpfchenbewässerungsanlagen, deren Errichtung und Wartung sehr aufwendig sind. Jedoch könnte durch modernere Bewässerungsverfahren viel Wasser eingespart werden, bei Beregnung etwa 30%, bei Tropfbewässerung 70% (BLISS 2006).

Das Wasser aus den Brunnen wird in einem Beruhigungsbecken aufgefangen und über mehrere Hauptkanäle durch das Bewässerungsgebiet geführt. Von dort wird es in kleinere Kanäle geleitet und meist noch einmal in Gerinne dritter Größenordnung auf die Felder verteilt. Die Wasserverteilung erfolgt nach genau bemessenen Schüttungszeiten für jeden Anlieger eines Brunnens. Sobald diese Zeitspanne abgelaufen ist, wird der Kanal wieder blockiert und das Wasser für den nächsten Anlieger freigegeben. Die Feldkanäle zweiter oder dritter Ordnung sind zum größten Teil unbefestigte Erdgerinne, im alten Bewässerungsland auch die Hauptkanäle. Sie werden zwar mit Lehm verdichtet, sind aber dennoch erheblicher Erosion oder Verschlammung ausgesetzt und begünstigen so Wasserverluste. Im neuen Bewässerungsland sind die Hauptkanäle zwar zementiert, doch trotz gut durchdachter Bewässerungssysteme hat die Wasserverschwendung seit Beginn der Neulandgewinnung eher zugenommen (BLISS 2006). Auch verlor das Wasser erheblich an Wert, da es aus den Regierungsbrunnen kostenlos an die Bauern verteilt wurde (BLISS 2006).

Die Bewässerung erfolgt je nach Bedarf. Für die Bewässerung von Gemüse werden mindestens 50 Minuten alle 5 Tage veranschlagt. Die Bewässerung von Palmen erfolgt in etwa alle 15 Tage für 150 Minuten, jedoch werden Palmen zum Teil nur indirekt über Versickerungsverluste aus den Zuleitern bewässert. Generell wird von den Behörden eine tägliche Wassermenge von 20 m³ pro *feddan* veranschlagt, wobei ein *feddan* ungefähr einem Areal von 4.200 m² entspricht. (BLISS 2006).

3.3.3 Neulandgewinnung

Von der Neulandgewinnung, die seit der Regierungszeit Präsident Nassers verfolgt wird, war auch die Oase Bahariya betroffen, jedoch nur anfänglich. Es wurden lediglich 500 bis 1.000 *feddan* (210 ha bis 420 ha) Neuland geschaffen, trotz einer Landreserve von 45.000 *feddan*. Mit den Feldern, die in jüngerer Zeit an der Straße Bahariya-Farafra entstanden, wuchs die Neulandfläche in etwa auf das Dreifache an. (BLISS 2006)

Es werden 3 Jahre für die Planierung, eine erste Entsalzung und die Anlage bodenverbessernder Kulturen benötigt, um das Neuland vorzubereiten. Bei lehmigen Wüstenböden kann nach 6 Jahren bereits die maximal mögliche Fruchtbarkeit der Böden erreicht werden. Bei sandigen Böden erreicht man in der Regel nach 5 Jahren 71% und nach 10 Jahren die volle Produktivität. (BLISS 2006). Jedoch spielen nicht nur die Bereitstellung

von Boden und Wasser, sondern auch andere Faktoren eine Rolle, die bei der Planung des Projektes „Neues Tal“ aber vernachlässigt wurden. BLISS (2006 nach INTLEKOFER 1983) nennt folgende Einschränkungen:

- Überstürzte Planung und Ausführung führten zur Auswahl ungeeigneter Flächen, wodurch die Wirtschaftlichkeit fraglich ist
- Im Vergleich zum Altland sind die natürlichen Produktionsbedingungen der Neulandflächen unzureichend. Das Ertragsniveau ist niedrig bei hohen Produktionskosten
- Isolation der Neulandsiedler
- Die Vermarktung der Oasenerzeugnisse ist schwierig
- Be- und Entwässerung erfolgen oft unzureichend und haben Bodenversalzung zur Folge
- Leistungsabnahme der Tiefbrunnen und damit steigenden Förderkosten
- Gefahr der Versandung

3.3.4 Drainage

Eine gute Drainage ist unabdingbar für die Oasenwirtschaft. Die Drainagegräben müssen regelmäßig repariert, gereinigt und von Schilf befreit werden. Das salzhaltige Bewässerungswasser muss mit ausreichend Frischwasser abgeführt werden, der Prozess der Versalzung kann nur so verhindert werden. Um die Verdunstung und den Wasserverbrauch so gering wie möglich zu halten, wurde in der Oase meist in der Nacht bewässert. Die Arbeit ist jedoch schwierig und unbequem und da durch die Regierungsbrunnen heute genug Wasser bereitgestellt wird, verzichten viele Bauern auf Nachtbewässerung. Das unkontrollierte Abfließen und Versickern des Bewässerungswassers aus den neuen Brunnen kann jedoch die sekundäre Salzanreicherung durch Anhebung des Wasserspiegels auch im Kulturland verstärken (BLISS 2006).

Die Drainage im alten Bewässerungsland erfolgt über die natürliche Entwässerung in Hanglage. Am Hangfuß wird das Wasser in Drainagegräben aufgefangen, in größeren Gräben zusammengeführt und in die tiefer gelegenen Wüstengebiete abgeleitet. Dort bilden sich in der Bewässerungssaison große Salzseen, die zeitweise verdunsten und großflächige Salzausfällungen zurücklassen. In den *El-Mamour*, einem See im Nordwesten, werden die

Teilgebiete Bawiti und al-Mamour entwässert. Zwei kleinere Entwässerungssümpfe liegen zwischen den Teilgebieten Zabu und Quasaa im Osten der Oase. Das neue Bewässerungsland befindet sich in tiefer gelegenen und flacheren Gebieten, die Entwässerung ist daher schwieriger und die Gefahr der Versalzung größer. Dieser Effekt wird jedoch zum Teil durch den höheren Sandanteil und die bessere Infiltrationsfähigkeit der Böden abgemildert (siehe Kapitel 6.4.1).

Eine Besonderheit findet sich im Kulturland Zabu, wo sich inmitten des alten Palmenbestandes zwei flachere Bereiche von jeweils 1 ha Größe befinden, die als eine Art Zwischenspeicher dienen, bevor das Sickerwasser an tiefer gelegener Stelle in Drainagegräben kanalisiert wird. Im ältesten Kulturland Bawiti, das sich nördlich des Hauptorts erstreckt, wird ausschließlich über das natürliche Gefälle entwässert, das kontinuierlich von Süden nach Norden abfällt. In al-Mamour gibt es eine hügelige Erhebung in der Nähe des Sees, wodurch die umliegenden Hänge eine natürliche Drainage erfahren. Das übrige Land ist eben und wurde erst im letzten Jahrhundert angelegt⁴. Ähnlich ist die Lage in Quasaa, dem jüngsten Kulturland, das von mehreren Drainagegräben durchzogen wird, jedoch kein natürliches Gefälle aufweist.

3.4 Kulturpflanzen

Nach Bliss (2006, p. 109) hat sich die landwirtschaftliche Produktion in den letzten 2000 Jahren kaum geändert. Die Hauptezeugnisse der Oase sind Datteln, Oliven und Getreide, hier vor allem Weizen, Gerste und Reis. In den alten Oasen Bawiti und Zabu findet sich noch häufig der für Oasen typische Stockwerksbau (siehe Abbildung 13). Das oberste Stockwerk, die Baumschicht, bilden die 8 m bis 15 m hohen Dattelpalmen sowie hohe Oliven- oder Aprikosenbäume. Darunter in 2 m bis 5 m Höhe befindet sich die Strauchschicht mit niedrigeren Obst- und Olivenbäumen, sowie Bananenstauden oder Tamariskensträuchern. Die Krautschicht unter 2 m bilden alle Arten von Getreide und Futterpflanzen. Meistens sind in der Oase jedoch nur zwei Stockwerke ausgeprägt. Bei dichtem Baumbestand ist es für

⁴ Karten aus dem Jahr 1903 (BLISS 2006, nach BALL 1930) zeigen zwei kultivierte Gebiete: *Zabu/Mandisha* und *Bawiti/El Qasr*. Das nördlich davon gelegene Gebiet, in welchem die heutigen Oasenteile *Mamour* und *Quasaa* liegen, wird als „Sandy Ground with scrub“ und „Dried-up salty Marsh“ beschrieben.

Unterkulturen häufig zu schattig oder der Boden schwer bearbeitbar, in der Strauchschicht finden sich dann vereinzelt Obstbäume, die Krautschicht besteht aus Wildkräutern und Gräsern und ist mit abgestorbenen Palmresten bedeckt. Liegt der Schwerpunkt auf Ackerkulturen, ist der Deckungsgrad der Baumschicht eher niedrig bzw. sind die Palmen kleiner, und eine Strauchschicht fehlt meist gänzlich.



Abbildung 13: Alter Palmenhain in Zabou (Bahariya) mit Aprikosenbäumen und jungem Palmenbestand in der Strauchschicht
Foto: Zandler (2010)

Im Folgenden werden ausgewählte Kulturpflanzen kurz beschrieben.

3.4.1 Datteln und Oliven

Dattelpalme. Ägypten ist ein Hauptanbaugebiet der Dattelpalme. In Bahariya stieg zwar die Zahl der Dattelpalmen im letzten Jahrhundert um etwa 30% an, jedoch reduzierte sich die Pro-Kopf-Relation, und die Datteln machen heute nicht mehr den Hauptteil des Einkommens aus (BLISS 2006). Die Dattelpalme ist optimal an extreme Bedingungen angepasst und erträgt über +50°C und bis zu -15°C, sehr geringe Luftfeuchtigkeit und hohe Salzgehalte in Boden und Wasser (1,5% Salzgehalt und bis zu 4 ppm Bor) (ACHTNICH 1980). Die Ansprüche an die Bodenqualität sind ebenfalls relativ gering, jedoch benötigt die Dattelpalme eine gute Wasserversorgung und eine gute Durchlüftung des Bodens bis in 1,2 m Tiefe (ACHTNICH 1980). Die Palme erreicht mit ihren weit verzweigten Wurzeln bis zu 6 m tiefe Bodenschichten und kann sich dadurch in den meisten Fällen über das Grundwasser selbst versorgen, ohne von der Bodenoberfläche zugeführte Wassergaben zu benötigen. Üblicherweise erreicht eine Jungpflanze nach einigen Jahren bereits den Anschluss an das Grundwasser, und die Oberflächenbewässerung kann eingestellt werden (ACHTNICH 1980).

Die Palmwirtschaft ist kaum mechanisierbar. Die Düngung alleine benötigt den Aushub einer Grube alle 5 Jahre neben jeder Palme, um den Dünger bis an die Wurzeln bringen zu können. Werden Ableger einer Palme eingesetzt und bewässert, bringen sie nach fünf Jahren ersten Ertrag. Die Bauern steigen drei Mal im Jahr auf die Bäume: einmal, um die weiblichen Blütenstände mit den männlichen zu bestäuben, ein weiteres Mal zur Ernte und ein drittes Mal im Winter zum Abschneiden der abgestorbenen Palmwedel (BLISS 2006). Die Datteln werden durch Trocknen an der Sonne oder durch die Herstellung von *agwa* haltbar gemacht. Agwa ist eine zähe Masse aus zerstoßenen und gepressten Datteln, die mehrere Monate gelagert wurde (BLISS 2006).

Ölbaum. Oliven sind neben den Dattelpalmen die wichtigste Nutzpflanze. Um die Produktion anzukurbeln wurden in den letzten Dekaden Setzlinge an Bauern verteilt, jedoch werden die Oliven v.a. für den Eigenbedarf verwendet. In einer traditionellen Ölmühle in Bawiti wird aus den Oliven Öl gewonnen, das auch zum Teil in den Handel gelangt (BLISS 2006). Der Ölbaum wird wegen seiner bevorzugt trockenen Standorte mit teilweise weniger als 200 mm Niederschlag im Jahr auch als Xerophyt bezeichnet. Er bringt jedoch erst bei 400 mm bis 600 mm volle Erträge (ACHTNICH 1980). Längere Trockenphasen können durch das bis 1,5 m tiefreichende Wurzelsystem überstanden werden. Der Ölbaum gehört zu den salzverträglichen Kulturpflanzen. So verträgt der Olivenbestand einer Anbaufläche in Algerien beispielsweise einen Chloridgehalt im Bewässerungswasser von 2g/l. Die Olive gilt als mäßig borverträglich. (ACHTNICH 1980).

3.4.2 Getreide

Reis. Im Jahr 1934 war Reis die Hauptgetreideart in der Oase. Die Reisanbauflächen machten 76% der Getreideanbauflächen aus (BLISS 2006), jedoch sind keine aktuellen Zahlen für Bahariya verfügbar. In Ägypten insgesamt stieg die Anbaufläche von Reis zwischen 1952 und 2003 um das Vierfache (IBRAHIM 2006). Der Vorteil des Reisanbaus liegt in der optimalen Salzauswaschung durch den hohen Wasserbedarf der Pflanze.

Weizen. Er ist die Hauptgetreidesorte Ägyptens und wird für die Brotproduktion verwendet. Als Viehfutter konkurriert Weizen jedoch mit Alexandrinerklee (*bersim*), der für die ägyptischen Feldarbeiter (Fellachen) bedeutender ist. Er kann öfter geschnitten und verkauft werden oder wird an die Tiere verfüttert (IBRAHIM 2006). Für die Bewässerung von Weizen

werden ca. 250 mm bis 400 mm, aufgeteilt auf 4 bis 5 Wassergaben über die Vegetationszeit veranschlagt (ACHTNICH 1980). Weizen gilt als salzverträglich in einem Bereich von 6-10 mS/cm und mäßig borverträglich (ACHTNICH 1980).

Gerste. Im Vergleich zu Weizen ist die Gerste weniger anspruchsvoll und salzverträglicher bei einem elektrischen Leitwert zwischen 10 und 16 mS/cm (ACHTNICH 1980). Sie wird daher bevorzugt als Pionierpflanze auf humusarmen und salzreichen Böden der Wüstengebiete angebaut (IBRAHIM 2006).

Hafer. Der Wasserbedarf von Hafer ist höher im Vergleich zu Weizen und Gerste. Er gilt zwar als „Säufer unter den Getreidearten“ (ACHTNICH 1980), verträgt jedoch wie Gerste einen elektrischen Leitwert des Bewässerungswassers zwischen 10 und 16 mS/cm (ACHTNICH 1980).

Mais. Er benötigt ca. 350 mm Wasser bei der Aussaat und bis zu 600 mm während der Vegetationszeit. Der Gesamtwasserbedarf beträgt 500 bis 800 mm bei 3-7 Bewässerungsgaben (ACHTNICH 1980). Mais ist salzverträglich (6-10 mS/cm) und mäßig borverträglich (ACHTNICH 1980). Durch den zum Teil notwendigen Einsatz von Dünger und Pestiziden kann es jedoch zu Kontamination der Böden kommen. Mais wird zur Brotherstellung verwendet, aber auch als Viehfutter (IBRAHIM 2006).

Hirse. Hirse ist trockenresistenter und salztoleranter als Mais, daher erfolgt der Anbau oft auf Salzböden und am Ende von Bewässerungskanälen. Hirse steht an vierter Stelle der Getreideanbauflächen nach Mais, Weizen und Reis (IBRAHIM 2006).

3.4.3 Obst und Gemüse

1981 waren die häufigsten Obstsorten in Bahariya die Aprikose mit 13.040 Bäumen, gefolgt von Orangen (3.601), Guaven (1.794) und Trauben mit 1.395 Bäumen (BLISS 2006). Bei den Erhebungen zu vorliegender Arbeit im März 2010 wurden aber vor allem Aprikosen, Mango- und Granatapfelbäume gefunden. Ein Problem beim Anbau von Obst und Gemüse ist, dass auf den Flächen keine zweite Ernte eingebracht werden kann, mit Ausnahme der Datteln. Seit den 1970er Jahren werden Obst- und insbesondere Apfelplantagen zunehmend mehr, vor allem auf Neuland in ehemaligen Wüstengebieten, da Ägypten hier auf gute Gewinne durch Export setzt. Der Apfelanbau ist jedoch bewässerungsintensiv und konkurriert mit dem für die ärmere Bevölkerung günstigeren Getreideanbau, wodurch es zur Verschärfung

sozialer Ungerechtigkeiten kommen kann (IBRAHIM 2006). Die häufigsten Gemüsesorten sind Tomaten, Kartoffeln, Favabohnen, Zucchini, Zwiebeln, u.v.m. Es wird jedoch immer mehr Gemüse importiert, und viele Einwohner kaufen nun die Produkte, die noch vor einer Generation selbst angebaut wurden (IBRAHIM 2006).

Aprikose: Die Aprikose gehört zu den Obstsorten mit sehr geringem Wasserbedarf und tief reichenden Wurzeln. Bei geringer Bewässerung bleiben die Früchte jedoch klein und der Ertrag gering. Sie ist schwach salzverträglich (ACHTNICH 1980).

Mango: der Mangobaum ist eine für den Bewässerungslandbau eher unübliche Kulturpflanze. Er wächst ursprünglich im tropischen Monsunklima. Um einen befriedigenden Ertrag zu erreichen, muss mindestens 1.000 mm Niederschlag im Jahresmittel fallen bzw. im selben Ausmaß bewässert werden. Eine weitere Voraussetzung ist ein tiefgründiger, von Staunässe freier Boden mit guter Wasserspeicherkapazität (ACHTNICH 1980).

Feige: der Feigenbaum ist sehr anspruchslos hinsichtlich Bodenfruchtbarkeit und Wasserversorgung, und kann auch Temperaturextreme bis hin zu Frost ertragen. Bei weniger als 500 mm Bewässerung im Jahr bringt er jedoch nur geringen Ertrag (ACHTNICH 1980). Seine Wurzeln reichen bis in 8 m Tiefe, benötigen aber einen gut drainierten Boden. Die Feige ist salzverträglich aber nur schwach borverträglich (ACHTNICH 1980).

Favabohne (ägypt.: ful). Sie ist für die ärmere Bevölkerung von großer Bedeutung und wird gekocht oder auch als Fladenbrot gegessen (IBRAHIM 2006).

Zucchini: die Zucchini gehört zu den Kürbisgewächsen. Sie haben, wie die meisten Gemüsesorten, einen besonders hohen Wasserbedarf und Nährstoffbedarf, und benötigen daher eine optimale Wasserversorgung (ACHTNICH 1980).

Zwiebel: die Zwiebel, benötigt etwa 450 mm bis 600 mm Wasser in der späteren Entwicklungsphase (ACHTNICH 1980). Die optimalen Böden sind warme, humos lehmige Sandböden. Diese können auch alkalische und mäßig saline Bedingungen aufweisen, ohne den Anbau zu beeinträchtigen (ACHTNICH 1980).

3.4.4 Futterpflanzen

Alfalfa (lat.: *Medicago sativa*): ein Charakteristikum dieser Luzernenart ist ihre Fähigkeit, den Wasservorrat eines großen Bodenraumes auszunutzen, wodurch sie auch längere

Trockenzeiten überstehen kann. 60% des benötigten Wassers wird aus einer Bodenschicht bis zu 30 cm Tiefe und weitere 24% werden aus der 40 cm tiefer gelegenen Bodenschicht entnommen (ACHTNICH 1980). *Alfalfa* wird wie alle Luzernen, zu denen auch der *Ägyptische Klee* gehört, vom Baumwollrüsselkäfer befallen. Daher findet der Anbau der Luzerne v.a. in Wüstengebieten statt, wo keine Baumwolle produziert wird.



Abbildung 14: Ein Bauer auf einem typischen Alfalfa-Feld in Quasaa
Foto: Zandler (2010)

Ägyptischer Klee (lat.: *Trifolium alexandrinum*; auch *Alexandrinerklee* oder *bersim*): ist weitverbreitet im Orient und Mittelmeerraum und gehört zu den einjährigen, krautigen Pflanzen (ACHTNICH 1980). Laut IBRAHIM (2006) nimmt Ägyptischer Klee 95% aller Futterpflanzen ein. Er wird normalerweise im Winter angebaut, da er nicht besonders hitze- und trockenbeständig ist. Er wird viermal geschnitten, wobei eine Sorte (ca. 30%) nur einmal geschnitten und dann untergepflügt wird. Dadurch reichern sich Humusstoffe an und ein Krümelgefüge entsteht, Kunstdünger kann besser gebunden werden und die Wasserspeicherkapazität wird erhöht. Zusätzlich wird die Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen verbessert (IBRAHIM 2006).

4. Methodik

Die Datenerhebung gliedert sich in Geländearbeit, bei der die Probennahme, die Aufnahme verschiedener Umweltfaktoren, sowie eine fotografische Dokumentation durchgeführt wurde, und die Laborarbeit, bei der allgemeine Kennzeichen sowie Einflussfaktoren der Bodenqualität erhoben wurden.

4.1 Geländearbeit

4.1.1 Erhebungsdesign und Probenahme

Die Vorgehensweise im Gelände erfolgte in Anlehnung an den *Soil Quality Test Kit Guide* des United States Department of Agriculture (USDA 1999). Das adaptierte Probennahmeprotokoll befindet sich in Anhang 2.

Die Auswahl der Flächen erfolgte nach den in Kapitel 1.3 genannten Einflussfaktoren. So wurden für den jeweiligen Oasenteil repräsentative Flächen (z.B. Einflussfaktor Vegetation: dichter Dattelpalmenwald) beprobt, sowie Flächen, deren Indikatoren für Bodenversalzung von jenen abweichen (z.B. Einflussfaktor Vegetation: Brache). Wenn ein Gradient ersichtlich wurde – z.B. stetige Zunahme der Vegetation von Punkt A nach Punkt B – wurden Flächen entlang dieses Gradienten beprobt. Die Größe der Flächen richtete sich meist nach Grenzen wie Bewässerungsgräben oder einer Änderung im Bestand, welche berücksichtigt wurde um Homogenität zu gewährleisten. Innerhalb der Flächen wurde an drei bis sechs Standorten jeweils in einer Tiefe von 5-10 cm sowie in 10-15 cm des Bodens Stechzylinderproben zu je 100 cm³ genommen und diese gemischt (Abbildung 15).

Am Abend wurden im provisorischen Feldlabor (Abbildung 15) die genommenen Proben regelmäßig auf ihre elektrische Leitfähigkeit mit einem LF-Messgerät und ihrem pH-Wert mit einem pH-Meter getestet, sowie deren Körnung mit der Fingerprobe (USDA 1999) erfasst. Aufgrund dieser Aufnahmen wurden an den letzten Tagen die repräsentativen Flächen für die Profilgrabungen bestimmt.

Diese repräsentativen Bodenprofile wurden mit Stechzylindern in diskreten Abständen von 10 cm beprobt und in Anlehnung an SPONAGEL (2005) dokumentiert. Bei besonderen Horizonten wurden zusätzliche Proben genommen. Die Bestimmung der Bodentypen

erfolgte nach der deutschen Ausgabe der World Reference Base (IUSS Working Group WRB 2007).



Abbildung 15: Geländearbeit. Links: Probenahme mittels Stechzylinder, Rechts: Analysenvorbereitung im provisorischen Labor. Fotos: Hudribusch (2010)

Um eine Aussage über ein Gebiet in der Größenordnung der Oase Bahariya tätigen zu können, sollten bei einem Maßstab von 1:50.000 etwa 2 bis 4 Flächen pro km² beprobt werden (HAZELTON & MURPHY 2007, nach DLWC 2000). Diese allgemeinen Richtlinien wurden in der vorliegenden Arbeit weitgehend erfüllt, wodurch die Oasenteile auf einer Maßstabsebene von 1:50.000 vergleichbar sind.

Zusätzlich zur Probenahme wurden weitere Informationen über die Standorte erhoben:

- Eine Skizze der Aufnahmefläche inkl. Koordinaten, Höhe ü. NN, geschätzter Geländeneigung, Datum und Uhrzeit, sowie Be- und Entwässerungsgräben, besondere Auffälligkeiten wie Salzausfällungen oder Brandflächen
- Angaben zur Vegetation: Art der Vegetation bzw. der landwirtschaftlichen Nutzung, Schätzung der Deckungsgrade von Kraut- Strauch- und Baumschicht, jeweils in Klassen von 0-10%, 10-20%, etc. (in Anlehnung an TRAXLER 2007), Besonderheiten wie Schädlingsbefall o.ä.
- Befragung der Landwirte (wenn zugegen). Folgende Fragestellungen waren zur Beurteilung der Ausgangslage vor Ort von Interesse:

Wie oft und wie lange wird bewässert?

Aus welchem Brunnen wird das Wasser entnommen?

Wie tief ist dieser Brunnen bzw. handelt es sich um heißes oder kaltes Wasser?

Gibt es Schädlinge, Probleme mit Versalzung oder anderes?

Wird gedüngt (wie oft und wieviel)?

4.1.2 Erhebung der Wasserqualität

Im Rahmen des Projektseminars wurde von den Studierenden u.a. auch die Wasserqualität in der Oase dokumentiert. Im Gelände wurden (1) die elektrische Leitfähigkeit, (2) der pH-Wert und (3) die Temperatur gemessen. Die Analysen im Labor des Instituts für Geographie der Universität Erlangen umfassten die Bestimmung von (4) Kalzium, Kalium, Magnesium und Natrium mittels Atomabsorptionsspektrometer (AAS), sowie (5) den Gehalt an Sulfat und Chlorid. Mittels Tracer fanden Schüttungsmessungen statt, die Aufschluss über das Alter der Quelle geben. Nach ACHTNICH (1980) ist Natrium im Bewässerungswasser besonders für bodenkundliche Fragestellungen relevant, da es zu Verschlammung und im trockenen Zustand zu Krustenbildung führen kann, wodurch die Pflanzen in ihrem Wachstum behindert werden. Das Sodium-Adsorption-Ratio (SAR) ist eine geeignete Kennzahl, um das Schädigungspotenzial von Natrium festzustellen. Dabei wird Na mit dem Anteil von Ca und Mg in Beziehung gesetzt:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

4.1.3 Schwierigkeiten während der Geländeerhebung

Die wichtigsten Ziele der Aufnahme im Gelände waren, die Oasenteile möglichst flächendeckend zu beproben und möglichst viel Information über Lage und Zustand der beprobten Flächen sowie deren Be- und Entwässerung zu erhalten. Das gestaltete sich im Gelände oft schwierig – folgende Probleme traten dabei auf:

- Nicht immer war ein Übersetzer zugegen, wodurch nicht für jede Fläche Informationen über die Bewässerung eingeholt werden konnten;
- Das Gelände war schwierig zu begehen, was dazu führte, dass die Lage der umliegenden Be- und Entwässerungsgräben oft nicht exakt lokalisiert werden konnte;
- Da zur Zeit der Erhebungen bereits intensiv bewässert wurde, erreichten wir bei einigen Profilen bereits nach weniger als 1 m das Grundwasser.

Andere Faktoren, wie die begrenzte Erhebungszeit von 9 Tagen oder auch Verzögerungen durch den Ersatz von abgenutztem Arbeitsmaterial und ähnliches, trugen ebenfalls zu

Behinderungen bei der Erhebung bei. Davon betroffen sind jedoch nur die Informationen zu Dauer und Menge der Bewässerung sowie die Quellen des Bewässerungswassers.

4.2 Labormethodik

Der Großteil der Analysen erfolgte im Labor des Instituts für Geographie der Universität Wien, mit Ausnahme der Stickstoffanalyse, die von Fr. Dr. Ute Schmidt im Labor des Instituts für Geographie der Universität Erlangen durchgeführt wurde. Die Kationenaustauschkapazität (KAK) wurde im Labor des Instituts für Geographie vorbereitet und unter der Aufsicht von Ass. Prof. Mag. Dr. Wilfried Körner und Laborassistentin Fr. Petra Körner im *Department of Environmental Geosciences* gemessen, wo auch die Kohlenstoffanalyse durchgeführt wurde.

4.2.1 Probenvorbereitung

Ein Teil der Proben wurde für die Korngrößenanalyse vorbereitet und mit 0.1 mol/l Natriumpyrophosphat (NaPO_4) versetzt. Damit wird ein Dispergieren der Bodenteilchen ausgelöst, um die Korngrößen besser voneinander trennen zu können. Ein weiterer Teil wurde für folgende Analysen in verschlossenen Behältern lichtgeschützt aufbewahrt. Der Rest wurde für chemische Untersuchungen luftgetrocknet, vorsichtig zerstoßen und danach durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 2 mm gesiebt, um Feinboden zu erhalten.

4.2.2 Lagerungsdichte

Da die Proben einer Fläche gemischt wurden, repräsentiert eine solche Mischprobe die obersten 15 cm einer Aufnahmefläche. Diese Mischproben wurden im Feldlabor luftgetrocknet und deren Lagerungsdichte gravimetrisch über folgende Formel nach BLUME et al. (2010) bestimmt:

$$\rho_B = \frac{m_f}{V_g}$$

ρ_B ist die Dichte des Bodens oder Lagerungsdichte, die definiert wird durch die Masse der Festsubstanz m_f , welche im Volumen V_g enthalten ist. Die Angabe erfolgt in g/cm^3 .

4.2.3 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenanalyse der Kies- und Sandfraktionen erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM L 1061-2 (2002) mittels Schüttelappartur mit Maschenweiten der Siebe von 2 mm (Kies), 0.63 mm (Grobsand), 0.2 mm (Mittelsand) und 0.063 mm (Feinsand). Die Korngrößen wurden in Schälchen überführt, bei 105°C für 24 h bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank getrocknet und danach gewogen.

Die Bestimmung der Schluff- und Tongehalte erfolgte mittels Sedigraph. Um gute Ergebnisse zu erzielen, ist eine Einwaage von mind. 4 g, optimal 6 g Schluff und Ton nötig. Dazu musste zunächst der Anteil der Schluff-/Ton-Fraktion anhand des Sandanteils geschätzt und die nötige Menge Boden eingewogen werden. Diese wurde mit Zufuhr von 1 l Wasser durch ein Sieb mit 0.063 mm Maschenweite gesiebt, um die Sandfraktion entfernen zu können. Nach mehrmaligem Rühren, um die Salze zu lösen, ließ man den Boden über Nacht absetzen, saugte das überstehende, salzhaltige Wasser ab und trocknete den Rückstand der Schluff- und Tonfraktion im Trockenschrank. Diese Proben wurden anschließend mit 0.1 mol NaPO_4 versetzt und im Sedigraph analysiert.

Durch teils sehr hohe Sandanteile (bis zu 96%), mussten die betroffenen Proben für die Analyse im Sedigraph ausgeschlossen werden, da die nötige Einwaage von Schluff und Ton nicht erreicht wurde. Für das weitere Vorgehen sei auf Kap. 4.3.5 verwiesen.

4.2.4 Leitfähigkeit und Gesamtsalzgehalt

Zur Bestimmung der Salinität wird üblicherweise eine Leitfähigkeitsmessung durchgeführt, da die Salze im Wasser bzw. der Bodenlösung die Leitfähigkeit erhöhen. Diese wurde nach der ÖNORM L 1092 (1993) bestimmt. Die Einwaage von 5 g wurde 50 ml mit entionisiertem Wasser aufgefüllt (Verhältnis 1:10), kurz aufgeschüttelt, über Nacht stehen gelassen und am nächsten Tag für eine Stunde in die Schüttelapparatur gegeben. Nach Absetzen des Bodens wurde im Überstand mit einer LF-Sonde die Leitfähigkeit gemessen.

Die Berechnung der Leitfähigkeit des Sättigungsextraktes (EC_e) erfolgte durch Multiplikation mit Faktoren für die jeweilige Bodenart nach BILLEN & STAHR (2009, nach SLAVICH & PETERSON 1993). Der Gesamtsalzgehalt wurde nach ACHTNICH (1980) durch Multiplikation des LF-Werts mit dem Faktor 0.63 errechnet.

4.2.5 pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration in der Bodenlösung (BLUME et al. 2010). Bsp.: ein pH-Wert von 7 entspricht einer Wasserstoffionenkonzentration von 10^{-7} mol/l. Die Bestimmung des aktuellen pH-Werts (pH_{akt}) erfolgte in einem Eluat aus Boden und entionisiertem Wasser im Verhältnis 1:10. Hierzu wurden die Proben wie unter 4.2.4 aufbereitet. Die Messung des potenziellen pH-Werts (pH_{pot}) erfolgte deckungsgleich, jedoch in einer CaCl_2 -Lösung mit der Konzentration von 0.01 mol/l nach ÖNORM L 1083 (2006). Die Messung wurde nach kurzem Absetzen mit einem pH-Meter durchgeführt, welcher in regelmäßigen Abständen geeicht wurde.

4.2.6 Kationenaustauschkapazität (KAK)

Laut ÖNORM L 1086-1 (2001) entspricht bei neutralen oder alkalischen Böden die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) weitgehend der potenziellen Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}), und die Summe der basischen Kationen entspricht der KAK (bzw. beträgt die Basensättigung annähernd 100% - Anm. d. Aut.). Die Analyse erfolgte demnach in Anlehnung an die ÖNORM L 1086-1 (2001) zur Bestimmung der KAK_{eff} mit Bariumchlorid als Austauscherlösung. Es wurde kein Rücktausch vorgenommen.

Zunächst wurden 5 g Boden eingewogen und mit 100 ml BaCl_2 -Lösung ($c = 0.1$ mol/l) versetzt. Es wurde über Nacht stehen gelassen, anschließend in der Schüttelapparatur für 2 Stunden geschüttelt und danach durch einen Faltenfilter filtriert. Das Filtrat wurde an Dr. Körner zur Analyse im Photometer übergeben.

4.2.7 Kohlenstoffgehalt

Für die Bestimmung des Kohlenstoffgehalts wurde die Verbrennungs-Methode (ÖNORM L 1080 1999) gewählt. Hierzu wurden die Proben fein gemörsert, in Schiffchen überführt und im Verbrennungsofen in zwei Schritten bei 500°C und 1000°C verbrannt. Das dadurch entweichende CO_2 wird gemessen und aufgezeichnet. Die beiden Peaks geben über die Art des in der Probe enthaltenen Kohlenstoffs Aufschluss, so verbrennt bei 500°C der gesamte organische Kohlenstoff (C_{org} oder TOC) und bei 1000°C der restliche Kohlenstoff, was summiert den Gesamtkohlenstoffgehalt ergibt (C_{ges} oder TC).

4.2.8 Gesamtstickstoff

Für bodenökologische Untersuchungen besonders interessant wäre der Gehalt an NO_3^- (Nitrat) und NH_4^+ (Ammonium), da diese für die Pflanzenproduktion wichtig sind und als Dünger eingesetzt werden (BLUME et al. 2010). Die Bestimmung im Labor sollte jedoch an feldfrischen und gekühlten Proben vorgenommen werden, da es rasch zu Veränderungen der NO_3^- und NH_4^+ -Gehalte kommen kann (BLUME et al. 2010). Dies war vor Ort nicht möglich. Um dennoch eine Aussage über den vorhandenen Stickstoff tätigen zu können, wurden die Proben in einem C/N-Messgerät im Labor des Instituts für Geographie der Universität Erlangen gemessen. Dieses gibt als Ergebnis den Gesamtstickstoff und den Gesamtkohlenstoff aus.

4.3 Statistische Methoden

4.3.1 Deskriptive Statistik

Zur ersten Beschreibung der Daten wurden Boxplots angefertigt. Die Box repräsentiert alle Werte zwischen unterem und oberem Quartil. Als Lagemaß wird der Median in Form einer Linie in die Box eingetragen. Der Median teilt die Daten in zwei gleich große Hälften und ist damit stabiler gegenüber Ausreißern und Extremwerten als das arithmetische Mittel. Die Werte außerhalb der Box werden durch Linien repräsentiert, deren Enden die Extremwerte darstellen. Sind Ausreißer vorhanden, werden sie als Punkte abgebildet (HANDL 2010).

Über Histogramme wurde die Häufigkeitsverteilung und eventuelle Schiefe untersucht. Eine rechtssteile Verteilung, also ein häufigeres Vorkommen hoher Werte, wird als linksschief bezeichnet und vice versa. Die Frage, ob es sich um normalverteilte Daten handelt, wurde mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests geklärt.

4.3.2 Korrelation

Mit Korrelationsanalysen wird die Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen getestet. Die Richtung des Zusammenhangs oder eine wechselseitige Abhängigkeit können jedoch nicht ermessen werden (LEYER 2007). Für nicht-lineare Zusammenhänge, wie sie im vorliegenden Datensatz häufig sind, kann der Rangkorrelationskoeffizient R nach Spearman angewandt werden (LEYER 2007).

4.3.3 Transformation und Standardisierung

Für Hauptkomponentenanalyse und Clusteranalyse müssen die Daten standardisiert werden, um die unterschiedlichen Skalenniveaus vergleichbar zu machen. In Anlehnung an LEYER (2007) wurden zunächst Mittelwerte der Deckungsklassen gebildet, da diese die einzige ordinal skalierte Variable ist. Die Standardisierung erfolgte nun in R durch die Befehle *center* und *scale*. Dabei werden die Variablen zunächst um einen Nullpunkt angeordnet, indem der Mittelwert einer Variable von den Werten (Variablenausprägungen) der jeweiligen Variable abgezogen wird. Ihr arithmetisches Mittel ist nun Null (BAHRENBURG, GIESE und NIPPER 2008). In einem zweiten Schritt werden die Skalenniveaus angepasst. Dabei werden die Werte durch den Effektivwert der jeweiligen Variablen dividiert.

4.3.4 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist ein hierarchisch-agglomeratives Klassifikationsverfahren mit einer grafischen Darstellung als Dendrogramm (LEYER 2007). Dabei werden Ähnlichkeits- oder Distanzmatrizen gebildet, aufgrund derer die Zusammenfassung oder Trennung der Objekte zu Gruppen erfolgt. Diese „Cluster“ haben also die größtmögliche Unähnlichkeit zueinander. Für die vorliegende Arbeit wurde die Euklidische Distanz als Distanzmaß gewählt, da sie sich für abiotische Variablen gut eignet (LEYER 2007). Die Clusteranalyse erfolgte nach dem Ward-Verfahren. Nach BACKHAUS (1990) besteht das Ziel des Ward-Verfahrens darin, „... *jeweils diejenigen Objekte (Gruppen) zu vereinigen, die die Streuung (Varianz) einer Gruppe möglichst wenig erhöhen*“. Das Ward-Verfahren bildet etwa gleich große Gruppen, während andere Verfahren zu kleinen Gruppen oder Kettenbildung neigen (BACKHAUS 1990).

4.3.5 Behandlung fehlender Werte

Fehlende Werte im Datensatz können für eine Hauptkomponentenanalyse ein erhebliches Problem darstellen. Nach BACKHAUS (1990) gibt es drei Möglichkeiten, dem zu begegnen. Es können jene Fälle aus der Analyse ausgeschlossen werden, wo ein fehlender Wert bei einer Variable auftritt. Dies hätte eine starke Reduktion des Datensatzes zur Folge. Die zweite Möglichkeit besteht darin, nur die fehlenden Werte der Variablen auszuschließen. Dadurch entstehen unterschiedliche Variablenlängen, wodurch eine Vergleichbarkeit erschwert wird und manche Befehle in R nicht durchgeführt werden können. Es wurde daher auf die dritte Möglichkeit zurückgegriffen, die Lücken im Datensatz mit Durchschnittswerten nachträglich

zu füllen. Dies betrifft Informationen zu TOC-Gehalten (2 Fälle) und zu Ton- und Schluffgehalten (19 Fälle). Bis auf eine Ausnahme gehören alle dieser Fälle mit über 85% Sandanteil der Bodenart Sand an, ungeachtet der möglichen Schluff- und Tongehalte. Die Auswirkungen der Datenmanipulation halten sich daher in engen Grenzen und bleiben überschaubar. Die fehlenden Informationen zur Bewässerung und Wasserqualität hingegen konnten nicht durch Mittelwerte ersetzt werden – diese Variablen wurden aus der Hauptkomponentenanalyse vollständig ausgeschlossen.

4.3.6 Ordination

Das Prinzip der Ordination besteht aus einer grafischen Darstellung multivariater Zusammenhänge in einem Koordinatensystem. Sie findet vor allem in ökologischen Untersuchungen zu Artenvorkommen oder Artenverteilung entlang von Umweltgradienten Anwendung. Bei zwei Variablen ist es ein zweidimensionaler Raum, aufgespannt zwischen den zwei Variablen als Achsen, in welchem die Flächen als Punkte im Koordinatensystem eingetragen werden. Bei drei Variablen ist es ein dreidimensionaler Raum, usw. Die Ordination ist jedoch besonders für multivariate Analysen geeignet, die „*n-dimensionale Hyperräume*“ (LEYER 2007) bilden. Diese werden durch das Verfahren der Dimensionsreduktion auf zweidimensionale Darstellungen vereinfacht. Das Verfahren arbeitet jene Variablen bzw. Gradienten heraus, die in besonderem Maß für die Verteilung der Standorte im Koordinatenraum verantwortlich sind, und ordnet zusätzlich die Aufnahmen so an, dass ähnliche Standorte näher beieinander liegen. Dadurch können ähnliche Böden innerhalb der Oase identifiziert werden, und die Zusammenhänge zwischen Umweltvariablen und Bodeneigenschaften werden deutlich. Nach LEYER (2007) erfolgt die Darstellung im Koordinatensystem nach folgendem Prinzip:

„Die Ordination sollte die Unterschiede zwischen den Aufnahmen so zusammenfassen, dass mit möglichst wenigen Dimensionen oder Achsen ein möglichst großer Anteil dieser Unterschiede abgebildet wird. Entsprechend sind die ersten Achsen dann Achsen maximaler Varianz im Datensatz.“

Es gibt indirekte und direkte Verfahren der Ordination. Bei der indirekten Gradientenanalyse werden keine erklärenden Umweltvariablen einbezogen. Zu diesen Verfahren gehören die *Principal Component Analysis* (PCA), deren Modell auf linearen Zusammenhängen basiert,

und die *(Detrended) Correspondence Analysis* (D)CA, die auf einem unimodalen Modell basiert. Bei direkten Verfahren werden in einem zusätzlichen Schritt Umweltvariablen einbezogen, mit welchen die Ordinationsachsen korreliert sein müssen (PFEIFER 1999). Diese Verfahren sind die *Redundanzanalyse* (RDA) bei linearem Modell und die *Kanonische Korrespondenzanalyse* (CCA) bei unimodalem Modell.

Das unimodale Antwortmodell geht von der Annahme aus, dass sich die Standorte in Bezug auf die erhobenen Variablen entlang eines Optimums verhalten (LEYER 2007). D.h. es finden sich beispielsweise nur wenige Standorte mit extrem niedrigen oder extrem hohen pH-Werten, aber viele im mittleren Bereich (Optimum). Im vorliegenden Datensatz sind unimodale, aber auch lineare Zusammenhänge, wie beispielsweise bei der Leitfähigkeit vorhanden. Es wurden daher beide Verfahren (CCA und RDA) getestet.

Das Skript der R-Analysen ist in Anhang 3 beigelegt.

5. Ergebnisse

5.1 Parameter der Bodenqualität

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Bodenproben dargestellt. Die Darstellung der Profile erfolgt in Kapitel 5.2.

5.1.1 Lagerungsdichte

Die Dichte der Bodenproben, welche die obersten 15 cm des Bodens repräsentieren, variiert zwischen 1.15 und 1.82 g/m³. Es handelt sich um eine leicht linksschiefe Verteilung, d. h. die höheren Werte sind häufiger vertreten. Die Unterschiede bei der Lagerungsdichte in den verschiedenen Oasenteilen sind in Abbildung 16 dargestellt:

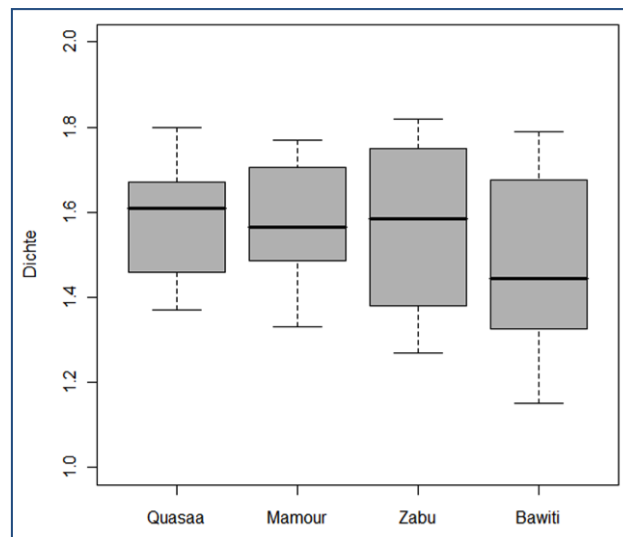


Abbildung 16: Lagerungsdichte in den Teilgebieten

In allen Teilgebieten zeigt die Dichte eine Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test: $p > 0.05$), wohingegen bei Betrachtung der gesamten Oase keine Normalverteilung auf diesem Signifikanzniveau vorliegt ($p = 0.04$). Die größten Dichteunterschiede gibt es in Bawiti. Die Korrelationsanalyse nach Spearman ergab Zusammenhänge zwischen der Dichte und pH_{akt} , Sand, Schluff und TOC (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Korrelationen zwischen Lagerungsdichte und anderen Parametern

Parameter	rho	p-wert
N	-0.41	0.001
TOC	-0.46	0.001
Deckung Strauchschicht	0.35	0.005
Schluff	-0.41	0.005
pH_{akt}	0.31	0.01
Ca	-0.29	0.05
Sand	0.28	0.05

5.1.2 Korngrößenverteilung

Die dominante Korngröße in der gesamten Oase ist erwartungsgemäß die Sandfraktion. Es gibt jedoch Unterschiede in den verschiedenen Oasenteilen, wie in Diagramm 1 dargestellt:

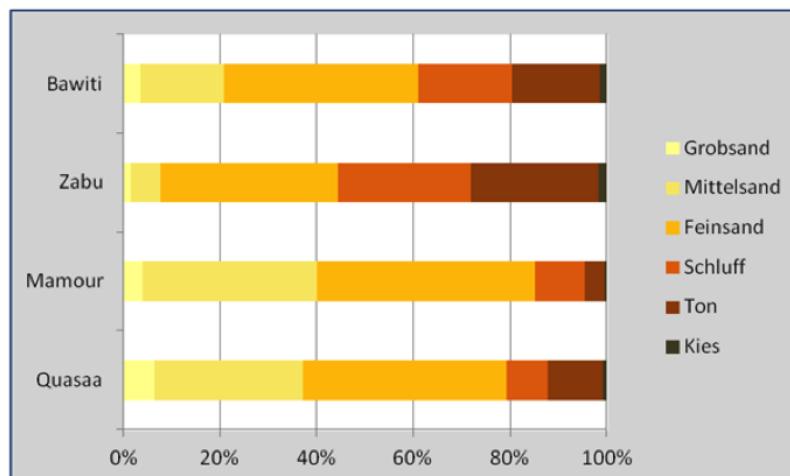


Diagramm 1: Durchschnittliche Anteile der Kornfraktionen (in %) in den vier Teilgebieten

Die Mittelwerte für die jeweiligen Oasenteile wurden in R errechnet und in Excel importiert. Für das Gebiet Mamour konnten Ton- und Schluffanteil lediglich für 3 von 12 Aufnahmeflächen gemessen werden - der Sandanteil beträgt hier im Durchschnitt 91 %. Die Mittelwerte der Ton- und Schluff-Fraktionen sind daher nicht signifikant, wurden aber für die kumulierte Darstellung in das Diagramm einbezogen. Das ton- und schluffreichste Teilgebiet ist Zabu mit durchschnittlich 27.6 % Schluff und 26.7 % Ton (gesamt > 50 %). Es handelt sich also fast ausschließlich um Lehm (L), sandigen Lehm (sL) oder lehmigen Sand (IS). Dasselbe gilt für das Teilgebiet Bawiti, mit häufigerem Auftreten von sL oder IS. In Mamour findet sich ausschließlich Sand (S), während in Quasaa auch IS, sL sowie toniger Sand (tS) vorkommen.

Um Ausreißer feststellen zu können, wurden Boxplots zur Korngrößenverteilung in den Teilgebieten angefertigt (siehe Abbildung 17):

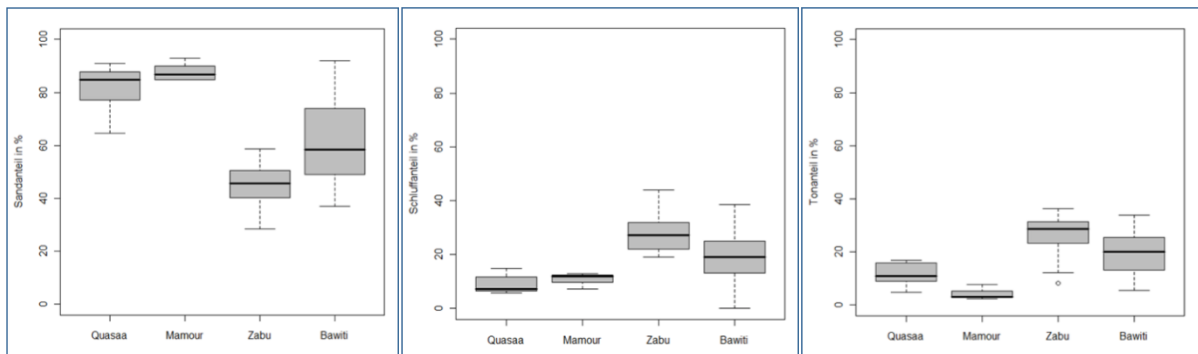


Abbildung 17: Boxplots zur Korngrößenverteilung in den Teilgebieten.
Links: Sandfraktion, Mitte: Schlufffraktion, Rechts: Tonfraktion.

Spannweite und Interquartilsabstand der Aufnahmen in Bawiti sind relativ groß im Vergleich zu den anderen Oasenteilen. Insbesondere beim Sandanteil sind 3. und 4. Quartil dominant, worauf in der Interpretation näher eingegangen wird. Der Shapiro-Test ($p < 0.001$) ergab eine Normalverteilung der Fraktionen Schluff und Ton. Die Sandfraktion ist nicht normalverteilt. Die Korngrößendreiecke und Summenkurven der Teilgebiete sind in Anhang 4 beigefügt.

5.1.3 Salzgehalt

Die Leitfähigkeit (EC) weist eine sehr ausgeprägte rechtsschiefe Verteilung auf. Der Shapiro-Wilk-Test ergab eine hochsignifikante Abweichung von einer Normalverteilung. Dies wird auch im Boxplot ersichtlich (siehe Abbildung 18). Der Maximalwert beträgt 6540 μS .

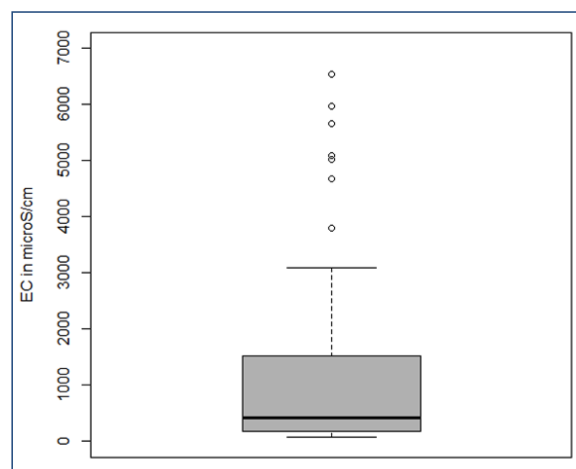


Abbildung 18: Boxplot der Leitfähigkeitsmessungen in der Oase

Diese Probe stammt von einer stark versalzten Fläche (Abbildung 19) in der Nähe des Mamour-Sees auf der sich bereits Salzausblühungen an der Bodenoberfläche gebildet haben.



Abbildung 19: Aufgegebenes Feld am Mamour-See mit Salzausblühungen an der Bodenoberfläche und abgestorbenen Palmen
eigenes Foto (2010)

Die Probe mit dem geringsten Leitwert von $81.8 \mu\text{S}$ stammt von einem Alfalfa-Feld im Teilgebiet Quasaa. Der Median liegt bei $426 \mu\text{S}$, was bedeutet, dass die Hälfte aller Werte darunter liegt. Es gibt jedoch einige Ausreißer und Extremwerte im oberen Bereich, die sich über die gesamte Oase verteilen, mit Ausnahme von Quasaa, wo der Maximalwert bei $1150 \mu\text{S}$ liegt (Abbildung 20):

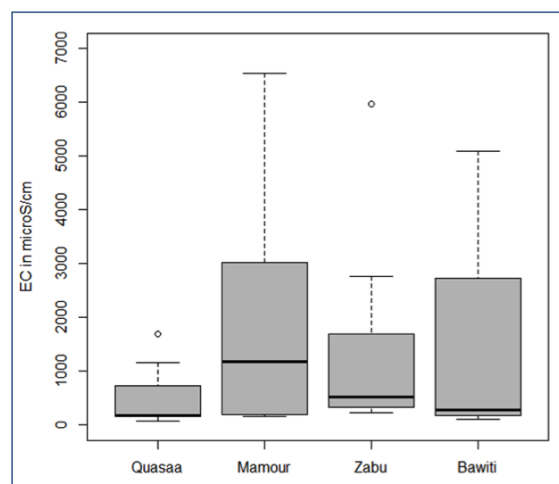


Abbildung 20: Leitfähigkeit (in $\mu\text{S/cm}$), dargestellt nach Teilgebieten

Die Spannweiten der Boxplots von Mamour und Bawiti sind besonders groß. Der Median in Mamour liegt jedoch mit $1173 \mu\text{S}$ wesentlich höher als in den anderen Oasenteilen (Quasaa: 186.4 ; Zabur: 515 ; Bawiti: 273.5). Der Korrelationstest nach Spearman ergab die in Tabelle 4 dargestellten Zusammenhänge:

Tabelle 4: Korrelationen (spearman's rho) der Leitfähigkeit mit anderen Parametern

Parameter	rho	p-Wert
Na	0.76	0.000
KAK _{pot}	0.75	0.000
Ca	0.64	0.000
Mg	0.61	0.000
K	0.60	0.000
Schluff	0.55	0.000
pH _{pot}	0.49	0.000
Bewässerungsdauer	-0.64	0.000
Deckung (mean)	-0.36	0.005
TOC	0.34	0.01
Sand	-0.34	0.01
Ton	0.29	0.05
Deck. Kraut	-0.28	0.05
Fe	-0.30	0.05

Tabelle 5: Korrelationen (spearman's rho) des pH_{pot} mit anderen Parametern

Parameter	rho	p-Wert
Na	0.37	0.005
Bewässerungsdauer	-0.58	0.005
KAK _{pot}	0.33	0.01
Schluff	0.33	0.05
Mg	0.25	0.05
K	0.25	0.05
Deck. Kraut	-0.26	0.05
Deckung (mean)	-0.28	0.05
Höhe ü. NN	-0.30	0.05

Hochsignifikante positive Zusammenhänge bestehen mit der Kationenaustauschkapazität und den einzelnen Kationen, v.a. Natrium, sowie mit Schluffanteil und pH-Wert. Je niedriger der Salzgehalt einer Bodenprobe, desto größer die Bewässerungsdauer und durchschnittliche Deckung der Vegetation, insbesondere jene der Krautschicht. Weitere negative Zusammenhänge bestehen mit Anteilen organischer Substanz, Sand, Ton und Eisen.

5.1.4 pH-Wert

Der aktuelle pH-Wert im Untersuchungsgebiet schwankt im alkalischen Bereich zwischen 7.25 und 10.43. Die Daten sind nicht normalverteilt (Shapiro-Wilk-Test: signifikant bei $p < 0.001$). Wie im Boxplot (Abbildung 21) ersichtlich wird, verursachen ein paar wenige Ausreißer die Abweichung von einer Normalverteilung:

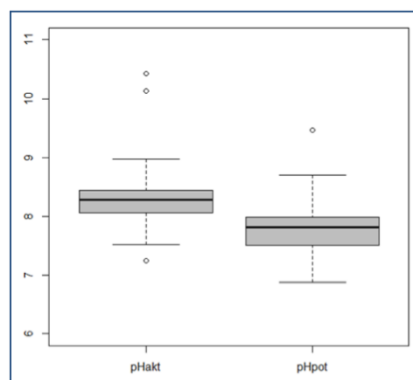


Abbildung 21: Boxplot des aktuellen und potenziellen pH-Werts im Untersuchungsgebiet

Bei Ausschluss der beiden pH-Werte >10 sind die Daten normalverteilt ($p=0.58$). Der Median des potenziellen pH-Werts liegt bei 7.81 und damit um etwa 0.5 pH-Einheiten niedriger als der Median des pH_{akt} mit 8.28. Auch hier würde der Ausschluss des Ausreißers eine Normalverteilung ergeben. Das Minimum des pH_{pot} liegt mit 6.88 im sehr schwach sauren Bereich, sein Maximum bei 9.46. Für die folgenden Analysen wurde nur mehr der pH_{pot} verwendet. Die Korrelationsanalyse (Tabelle 5) zeigt ähnliche Ergebnisse wie jene der Leitfähigkeit, jedoch auf z.T. niedrigeren Signifikanzniveaus. Außerdem korreliert der pH-Wert mit der Höhe des jeweiligen Standorts über dem Meeresspiegel.

5.1.5 Kationenaustauschkapazität

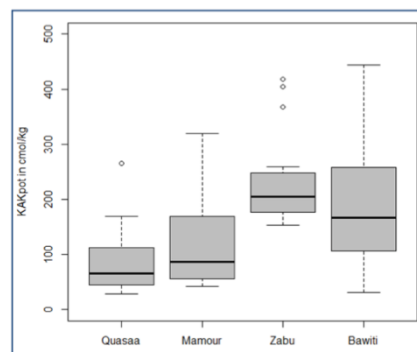


Abbildung 22: Die KAKpot in den Teilgebieten

Tabelle 6: Korrelation (spearman's rho) der KAKpot mit anderen Parametern

Parameter	rho	p-Wert
EC	0.75	0.000
Schluff	0.74	0.000
TOC	0.66	0.000
Ton	0.55	0.000
Kies	0.50	0.000
N	0.49	0.000
C_{anorg}	-0.50	0.000
Sand	-0.78	0.000
pH_{pot}	0.33	0.01
Bewässerungsdauer	-0.52	0.01

Die KAK_{pot} des Untersuchungsgebiets reicht von 28.54 mmol/kg bis zu 443.40 mmol/kg. Die Daten sind nicht normalverteilt (Shapiro-Wilk-Test: $p<0.005$). Innerhalb des Teilgebiets Zabu ist die KAK relativ homogen verteilt, mit Ausnahme von drei Ausreißern. In Bawiti ist die Streuung der Daten am größten, der Median liegt aber mit 167.12 mmol/kg nah an jenem

des Gebietes Zabü (Median: 204.52 mmol/kg). Die KAK_{pot} der Oasenteile Quasaa und Mamour zeigt eine ähnliche Verteilung. Je höher die Kationenaustauschkapazität einer Probe ist, desto höher sind auch Ton- und Schluffanteil der Probe. Ebenso gibt es einen positiven Zusammenhang zu TOC, N, der Leitfähigkeit, dem pH-Wert und dem Kiesanteil. Negativ korreliert die KAK mit dem anorganisch gebundenen Kohlenstoff, dem Sandanteil und der Bewässerungsdauer. Der Anteil der jeweiligen Kationen an der KAK ist in Diagramm 2 dargestellt:

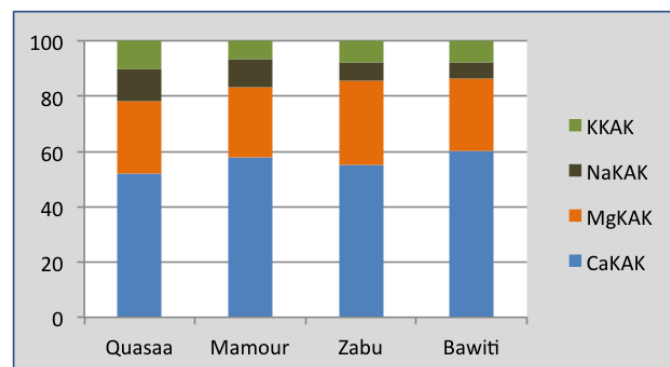


Diagramm 2: Anteile der Kationen an der KAK in den Teilgebieten

Die Basensättigung (Summe der Kationen Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ und K^+) liegt in allen Teilgebieten bei nahezu 100 %. Die höchsten Anteile an Natrium und Kalium wurden in Quasaa gemessen. Das Ca/Mg-Verhältnis ist am höchsten in Mamour mit 2.68, gefolgt von Quasaa und Bawiti mit jeweils 2.43, und Zabü mit einem Ca/Mg-Verhältnis von 2.19.

5.1.6 Kohlenstoff

Der anorganische Kohlenstoffgehalt (C_{anorg}) variiert zwischen 0.01 % und 2.38 % mit einem Median bei 1.34 %. In den Teilgebieten Quasaa und Mamour ist der Anteil an C_{anorg} relativ ausgeprägt. Die Mediane liegen hier nahe am Maximalwert. In Zabü sind die Werte eher niedrig (Median: 0.64 %). In Bawiti ist auch hier, wie schon bei Beobachtung anderer Bodenparameter, die Streuung der Werte groß im Vergleich zu den anderen Oasenteilen.

Der organische Kohlenstoffgehalt (TOC) ist in den Teilgebieten Zabü und Bawiti stärker vertreten. Der Maximalwert von 3.93 % wurde in einer Probe einer Weide in Bawiti gemessen, der kleinste Wert liegt mit 0.03 % in Quasaa. Korrelationen mit anderen Bodenparametern sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Korrelationen von TOC und C_{anorg} mit anderen Parametern

Korrelation mit Parameter	TOC		C_{anorg}	
	rho	p-Wert	rho	p-Wert
Sand	-0.75	0.000	0.69	0.000
Schluff	0.68	0.000	-0.38	0.01
Ton	0.54	0.000	-0.52	0.001
Kies	0.47	0.000	-0.63	0.000
KAK_{pot}	0.66	0.000	-0.50	0.000
N	0.89	0.000	-0.44	0.001
Ca	0.76	0.000	-0.58	0.000
Mg	0.73	0.000	-0.48	0.000
K	0.55	0.000	-0.40	0.01
Höhe ü. NN	0.43	0.001	-0.62	0.000
Dichte	-0.46	0.001		
Na	0.41	0.001		
EC	0.34	0.01		
Bewässerungsdauer	-0.53	0.01		
AS Baumschicht	0.28	0.05		

Anorganischer und organischer C haben jeweils gegengleiche Richtungen der Zusammenhänge, d.h. je höher der Anteil des TOC eines Standorts, desto niedriger ist der Anteil des C_{anorg} .

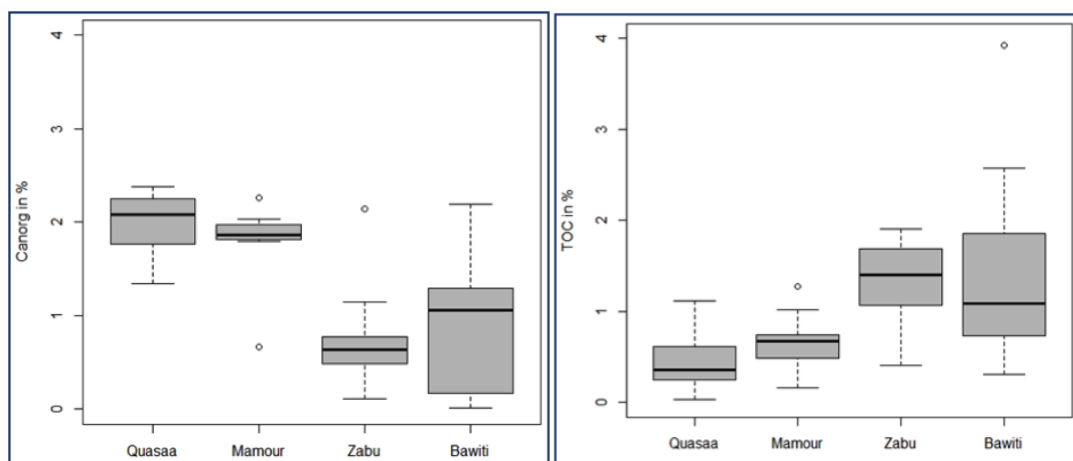


Abbildung 23: Boxplots zur Kohlenstoffverteilung in den Teilgebieten. Links: anorganisch gebundener Kohlenstoff (C_{anorg}) Rechts: organisch gebundener Kohlenstoff (TOC)

5.1.7 Stickstoff

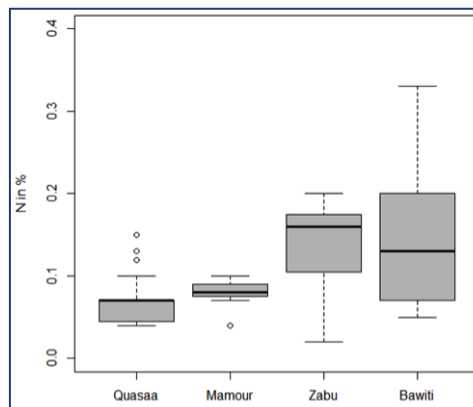


Abbildung 24: Verteilung des Stickstoffgehalts in den Teilgebieten

In Abbildung 24 sind die Stickstoffgehalte in den Teilgebieten dargestellt. Die Anteile reichen von 0.02 % bis 0.33 %. Die Maxima und die größte Spannweite liegen in Bawiti, gefolgt von Zabü, wo der Median mit 0.16 % am höchsten liegt, jedoch auch der niedrigste gemessene Wert auftritt. Quasaa und Mamour sind mit Medianwerten unter 1 % vergleichsweise stickstoffarm. Das C/N-Verhältnis ist zur Beurteilung von Stickstoffbindung und Zersetzungsgrad der organischen Substanz in Böden von Bedeutung (BLUME et al. 2010). Hohe C/N-Verhältnisse treten in der Oase jedoch nur als einzelne Ausreißer in den Teilgebieten Mamour und Zabü auf. Ansonsten liegen alle Werte unter 15 (Abbildung 25).

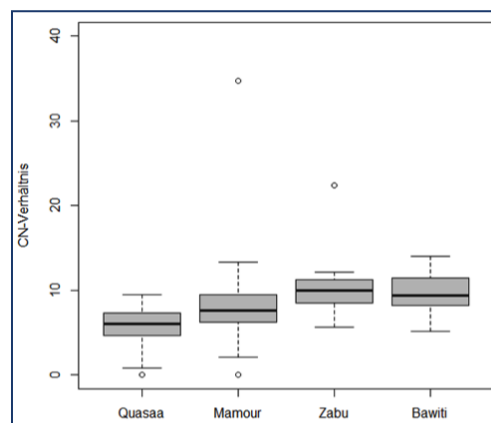


Abbildung 25: Boxplots zum C/N-Verhältnis in den Teilgebieten

Die Korrelation zwischen N und TOC ist erwartungsgemäß sehr hoch (Spearman's rho = 0.89). N korreliert ebenfalls positiv mit dem Schluff- und Tonanteil der Probe, sowie mit der KAK. Zudem korrelieren die durchschnittliche Deckung, insbesondere jene der Baumschicht mit dem N-Gehalt (rho = 0.29 bzw. 0.25). Negative Zusammenhänge zeigen N und

Lagerungsdichte, sowie N und Sandanteil, d. h. je höher der Sandanteil und je dichter die Lagerung des Bodens, desto geringer ist der Stickstoffgehalt.

5.2 Umweltparameter

5.2.1 Drainage

Die Erhebung der Drainagebedingungen erfolgte auf qualitativer Ebene (siehe Kapitel 3.3.4) für die einzelnen Teilgebiete. Die Informationen konnten letztendlich nicht quantifiziert werden, da sich die Oasenteile hinsichtlich der Drainagemethoden zu stark voneinander unterscheiden. In Gebieten mit deutlichen Hangneigungen erfolgt die Drainage durch die hangabwärts gerichtete Wasserbewegung, was eine geringere Zahl an Drainagegräben notwendig macht. Ein Vergleich auf der Ebene einzelner Untersuchungsflächen wäre daher wenig aussagekräftig.

5.2.2 Höhe und Hangneigung

Im Teilgebiet Zabü befindet sich die höchstgelegene Untersuchungsfläche auf 122 Meter über Normalnull (NN). Das Gebiet ist im Vergleich zu den anderen Oasenteilen relativ inhomogen hinsichtlich der Hangneigungen. Der südwestliche Bereich ist fast eben, im Zentrum der Oase befindet sich eine Eintiefung von 250 m Durchmesser und wenigen Metern Höhenunterschied, und gegen Osten und Norden beträgt das Gefälle zwischen 2 % und 3.5%. Der tiefste Aufnahmestandort liegt auf 102 m. In Bawiti liegt der höchste Standort mit 119 m ebenfalls relativ hoch, in diesem Teilgebiet wurde jedoch die gesamte Hanglänge bis zu einer Höhe von 96 m beprobt. Im oberen, südlichen, Teil Bawitis beträgt das Gefälle etwa 9 %, flacht gegen Norden rasch auf 5.5% ab, und beträgt ab der Oasenmitte etwa 1 %. In Mamour liegen die Aufnahmen zwischen 89 m Höhe am *Mamour*-See und 98 m Höhe am östlichsten Standort. Das größte Gefälle findet sich auf den Flächen in der Nähe des Sees und beträgt 3.5 %. Quasaa befindet sich durchschnittlich auf 97 m ü. NN und weist nur geringe Hangneigungen an vereinzelten Standorten auf. Die Bewässerungsflächen wurden in allen Teilgebieten vom Menschen eingeebnet. An steileren Hängen, wie in Bawiti und Zabü, sind jedoch auch die Oasengärten selbst stärker geneigt.

5.2.3 Deckung

Die Deckungsklassen der einzelnen Stockwerke wurden gemittelt, um statistische Tests anwenden zu können. Zusätzlich zum Schätzfehler (vgl. TRAXLER 2007) muss also ein Schwankungsbereich von $\pm 5\%$ angenommen werden. Die mittlere Deckung über alle Stockwerke ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Zahlen spiegeln die summierten Mittelwerte der Deckungsklassen wider, wodurch es zu Werten über 100 % kommt.

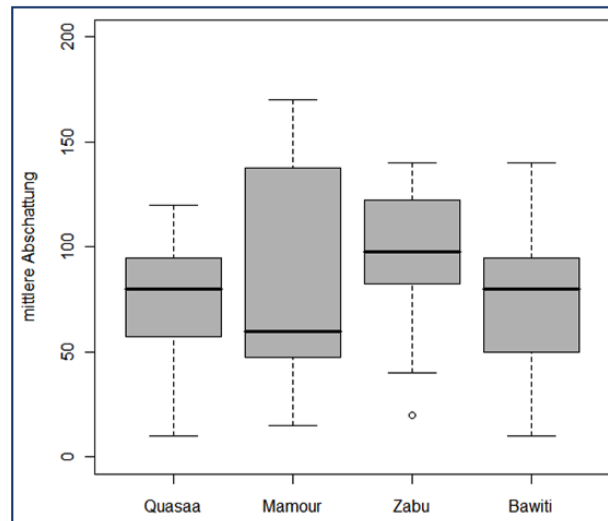


Abbildung 26: Summe der mittleren Deckungsgrade nach Teilgebieten in Prozent

Der Höchstwert liegt in Mamour mit 170 %. Die Krautschicht (Abbildung 27) weist besonders hohe Deckungsgrade auf, wie dies z.B. auf Alfalfa-Feldern insbesondere im Teilgebiet Quasaa der Fall ist. Da die Abschätzung durch die Vegetation für die Fragestellung von Bedeutung ist, wurden auch Palmreste und Streu in die Deckung der Krautschicht einbezogen. Dies bewirkt den relativ hohen Median im Teilgebiet Zabü, in welchem kaum Ackerbau betrieben wird. Eine dichte Baumschicht findet man auch auf vielen Flächen Mamours, wo erst seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts bewässert wird – anders in Quasaa, wo fast nur Gemüse, Getreide und Futterpflanzen angebaut werden. Die Deckung der Baumschicht erreicht hier nur auf drei Flächen über 10 %. Die Strauchschicht ist in der gesamten Oase kaum ausgeprägt, mit Ausnahme von vereinzelten Obstplantagen im Süden Quasaas und einer etwas deutlicher ausgeprägten Strauchschicht auf den Untersuchungsflächen Bawitis.

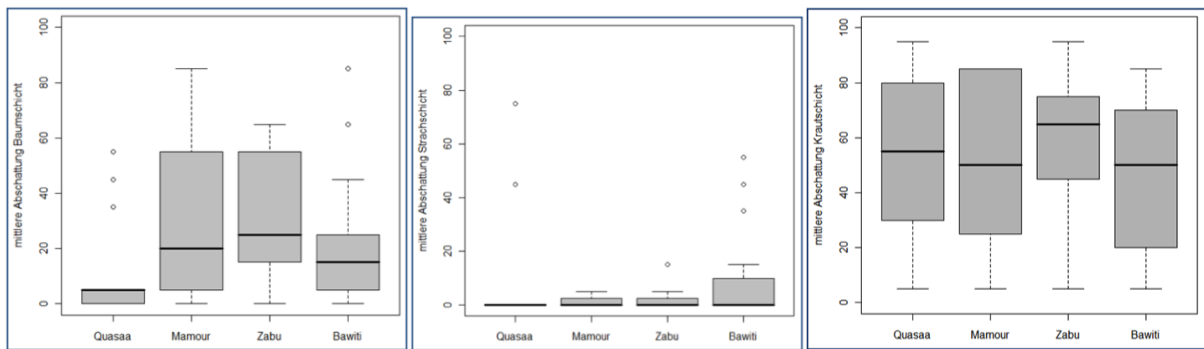


Abbildung 27: durchschnittliche Deckung der Baumschicht (links), Strauchschicht (Mitte), Krautschicht (rechts)

5.2.4 Bewässerung

Daten zur Bewässerungsdauer sind bei lediglich 33 von 68 Untersuchungsflächen erhoben worden (siehe Kapitel 4.1.3). Dennoch können mit den vorliegenden Daten Korrelationen zwischen Bewässerungsdauer und anderen Parametern eruiert werden. Das Untersuchungsgebiet Quasaa wird am intensivsten bewässert mit einem Medianwert von 47 h/Monat. Die Mediane der anderen Teilgebiete liegen hingegen nur zwischen 7 und 9 h/Monat (Abbildung 28).

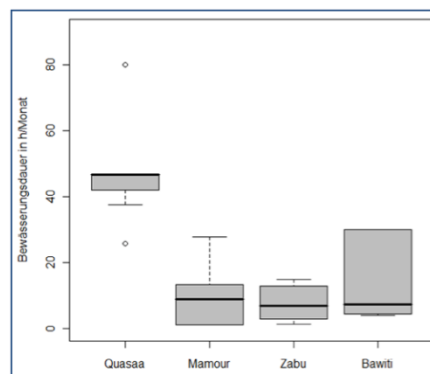


Abbildung 28: Bewässerungsdauer nach Teilgebieten

Tabelle 8 zeigt Korrelationen zu Parametern der Bodenqualität. Je mehr Bewässerung stattfindet, desto geringer sind Schluffgehalt, Leitfähigkeit, Gehalt an organischem Kohlenstoff, KAK und pH-Wert.

Tabelle 8: Korrelationen der Bewässerungsdauer mit Bodenparametern

Parameter	rho	p-Wert
Schluff	-0.62	0.001
EC	-0.63	0.005
pHpot	-0.57	0.005
KAKpot	-0.51	0.01
TOC	-0.52	0.01

5.2.5 Wasserqualität

Die Wasserqualität wird v.a. durch Salinität und Natriumgehalt bzw. dem SAR-Wert bestimmt (ACHTNICH 1980). Die pH-Werte befinden sich alle im schwach sauren bis schwach basischen Bereich, also um den pH-Wert 7, und konnten daher für die Analysen vernachlässigt werden. Die Zusammenhänge zwischen SAR, Leitfähigkeit, Temperatur und Tiefe der Quellen wurden in einem Pairplot (Abbildung 29) kombiniert. Hochsignifikant sind die Korrelationen von Leitfähigkeit und SAR-Wert (ρ : 0.80), sowie Leitfähigkeit und Wassertemperatur (ρ : -0.57). Je tiefer der Brunnen, desto niedriger ist der SAR (ρ : -0.49, p -Wert<0.01), aber desto höher die Temperatur (ρ : 0.32, p -Wert<0.05). Temperatur und SAR-Wert korrelieren negativ mit einem Spearman's ρ von -0.40 auf einem Signifikanzniveau von p <0.05.

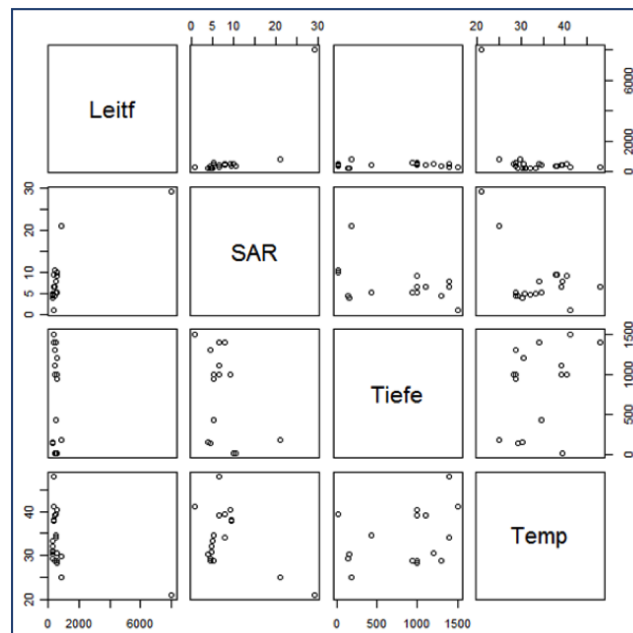


Abbildung 29: Pairplot der Daten zur Wasserqualität

5.3 Leitprofile

5.3.1 Teilgebiet Mamour

5.3.1.1 Profil 1



Ap (0-5 cm): dunkelbrauner Auflagehorizont;

CaCO₃: +

Go (5-35 cm): leichte Durchwurzelung, mittlere Wurzeldicke;

wenig organ. Material;

Farbe: gelblich-ocker;

CaCO₃: +

Bodenart: S

Gor (65-80 cm)

starke Durchwurzelung, dicke Wurzeln (Wg 5);

Farbe: ocker

Bodenart: S

bei 60 cm anstehendes Grundwasser (für die Aufnahme auf 80 cm abgegraben)

Abbildung 30: Profil 1 (Mamour)

Foto: Mayer (2010)

Dieses Profil wurde in dichtem Palmenbestand im Teilgebiet Mamour aufgenommen. Das Grundwasser in einer Profiltiefe von etwa 60 cm wurde für die Aufnahme bis zu einer Tiefe von 80 cm abgegraben. Der Boden hat einen sehr hohen Sandanteil von bis zu 97 %, im untersten Bereich auf 87 % leicht abnehmend. Die Tonfraktion macht hier lediglich 3 % aus, die Schlufffraktion 10 %. Der TOC beträgt unterhalb des Ah noch 0.5 %, nimmt dann aber rasch ab. Ab einer Tiefe von 65 cm ist der Boden stark durchwurzelt, v.a. von dicken Palmenwurzeln. Die Farbe ist hier dunkler, was hauptsächlich auf den Feuchtezustand zurückzuführen ist. Dennoch könnte es sich beim darüber liegenden Horizont um einen Albic Horizont (=Auswaschungshorizont) handeln. In den obersten 50 cm ist der Anteil

austauschbarer Kationen relativ gering im Vergleich zu den übrigen Profilaufnahmen, ebenso die Leitfähigkeit des Sättigungsextraktes (Diagramm 3). Im gesamten Profil ist kein Eisen enthalten.

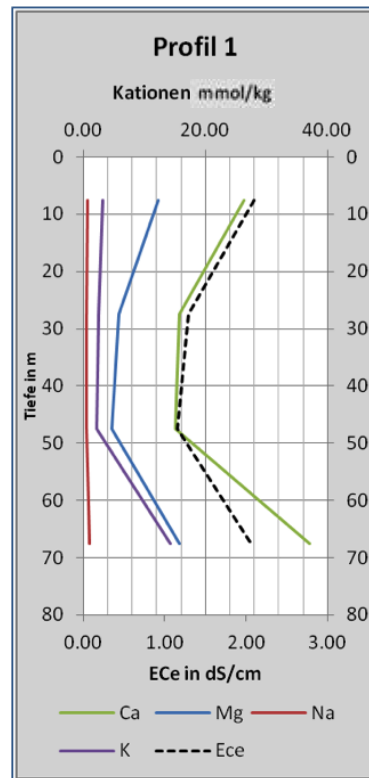


Diagramm 3: KAK und EC_e im Profil 1 (Mamour)

Es handelt sich bei diesem Profil um einen bewässerten Boden unter Grundwassereinfluss, jedoch mit arenic Eigenschaften (hohem Sandanteil). Nach der WRB-Klassifikation wäre dieser Boden ein Übergangstyp von einem **Gleysol (Arenic)** zu einem **Hydragric Anthrosol**.

5.3.1.2 Profil 2

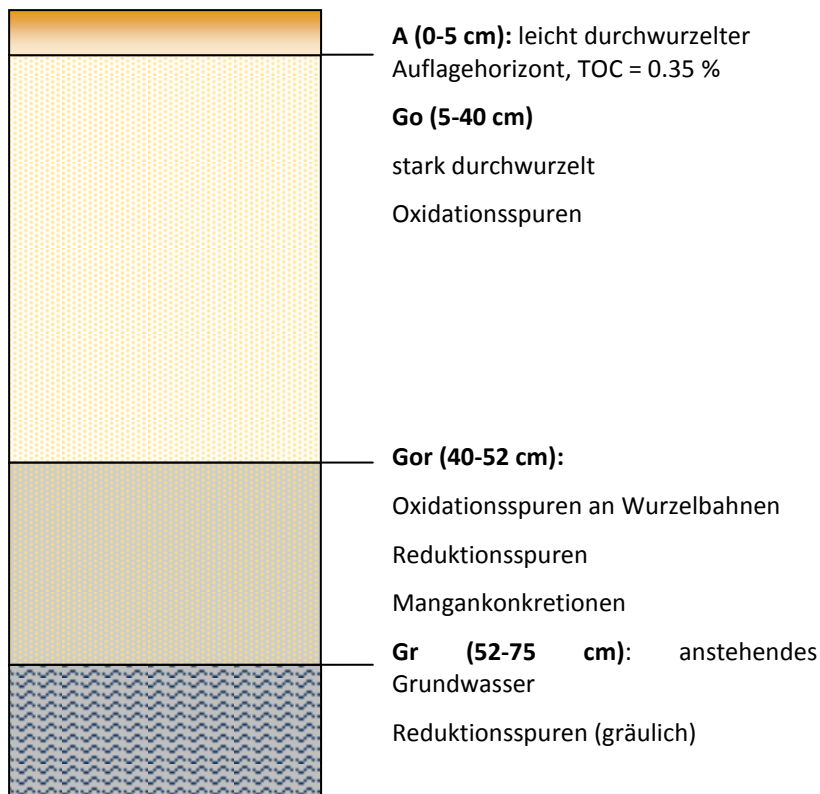


Abbildung 31: Skizze Profil 2 (kein Foto vorhanden)

Profil 2 wurde etwa 300 m westlich des ersten Profils gegraben. Es befindet sich unter einer Brache, die mit einem Deckungsgrad von 30-40 % mit Salzgeigern besiedelt ist und seit geschätzten 30 Jahren nicht mehr bewirtschaftet wird (EL SAIED, persönliche Mitteilung 03.2010). An der Oberfläche sind teilweise Salzausblühungen zu erkennen. Die Korngrößenverteilung ist jener von Profil 1 sehr ähnlich. Der Sandanteil liegt zwischen 87 % und 97 %, Ton- und Schluffanteil konnten wegen zu geringer Probenmenge im Labor nur für die obersten 20 cm untersucht werden. Hier nimmt der Schluffanteil von 12 % auf 5.2 % ab. Der Tonanteil liegt bei ~1.4 %. Diagramm 4 zeigt die Verteilung der Leitfähigkeit und der austauschbaren Kationen im Profilverlauf.

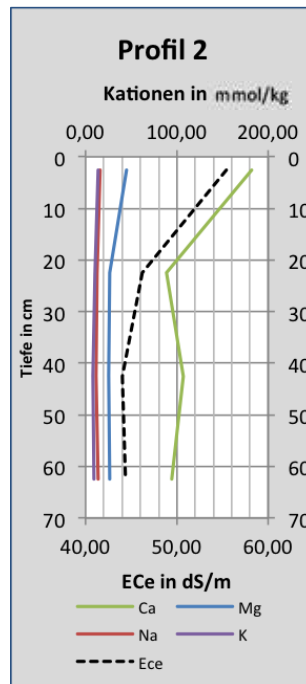


Diagramm 4: austauschbare Kationen und Leitfähigkeit im Profil 2 (Mamour)

Der Salzgehalt ist auf hohem Niveau relativ gleichverteilt, und steigt nur in den obersten 30 cm von 46 dS/cm auf 55 dS/cm an. Der Anteil an austauschbarem Ca verdoppelt sich in diesem Profilbereich. Der Mangangehalt steigt zwischen 20 cm und 65 cm Tiefe von 0.03 auf 0.06 bis auf 0.11 mmol/kg und war im untersten Bodenhorizont auch mit freiem Auge erkennbar. Im Gelände wurden zwischen 5 cm und 50 cm Tiefe Oxidationsspuren an Wurzelbahnen festgestellt, sowie Reduktionsspuren ab einer Tiefe von 40 cm. Das gesamte Profil ist stark durchwurzelt mit ~20 Wurzeln/dm². Der Boden kann als **Hypersalic Gleyic Solonchak (Arenic)** angesprochen werden.

5.3.2 Teilgebiet Zabü

5.3.2.1 Profil 3

Dieses Bodenprofil wurde am Rand einer Fläche mit niedrigem Palmenbestand (Deckung 60-70 %) und dichter Krautschicht (Deckung 70-80 %) in der Nähe einer großen Brache aufgenommen. In unmittelbarer Nähe befindet sich ein Entwässerungsgraben. Alle Horizonte des Profils entsprechen den WRB-Kriterien für Salic Horizonte, dennoch variiert der Salzgehalt mit der Tiefe (siehe Diagramm 5). Die Maxima befinden sich im oberflächennahen Horizont und dem Horizont Goz, der sich durch Farbe, Bodenart und Kationenzusammensetzung als Oxidations-Horizont kennzeichnet. Der Sandanteil ist hier

wesentlich höher als in den anderen Horizonten (Diagramm 5). Auch der Anteil an Na (in % an KAK) ist hier höher und liegt sogar über dem Ca-Anteil. Der HCl-Test (Karbonat-Zerstörung mittels 10%iger Salzsäure) ergab hohe Karbonatgehalte zwischen 0 und 50 cm Tiefe. Die Bodenart ändert sich im Profilverlauf zwei Mal von sandigem Lehm zu tonigem Lehm. Es kann daher zumindest beim Übergang von Horizont Go zu Gr von einem abrupten Bodenartenwechsel nach den diagnostischen Eigenschaften der WRB gesprochen werden. Der Reduktionshorizont Gr weist einen erhöhten Anteil an Aluminium (0.34 mmol/kg), einen hohen pH-Wert ($\text{pH}_{\text{akt}} > 8,5$), sowie hohe Tongehalte und ein Kohärentgefüge, was auf einen natric Horizont, wie er bei Solonetzen vorkommt, schließen lässt. Das SAR (Sodium Absorption Ratio), also das Verhältnis zwischen Na zu Ca und Mg, ist jedoch zu niedrig um den Kriterien eines Solonetz zu entsprechen (IUSS Working Group WRB 2007). Es handelt sich daher um einen **Hypersalic Gleyic Solonchak (Sodic)**.



Az1 (0-10 cm): salzreicher Oberbodenhorizont (Salzausfällungen an der Bodenoberfläche), mit $\text{EC}_e=29,7$, $\text{OS}=4,8\%$, $\text{CaCO}_3:++$, Bodenart: sL

Az2 (10-20 cm): mit Ton angereicherter Horizont, höhere Lagerungsdichte, weniger TOC (2,8%), salzhaltig ($\text{EC}_e=23$), gräulich, $\text{CaCO}_3:++$, Bodenart: L

Goz (20-50 cm):

salzreicher Horizont ($\text{EC}_e=31,6$), gelblich-ockerfarben, hoher Sandanteil, stark durchwurzelt, Wurzeln z.T. verwittert, $\text{CaCO}_3:++$, Bodenart: sL

Grz (50-100 cm):

gräulich-schwarzer Horizont, mit Ton angereichert, stark durchfeuchtet, Reduktionsmerkmale, Al-Konkretionen, vereinzelt Kies, salzhaltig ($\text{EC}_e \sim 20$), $\text{CaCO}_3:+$ (lang anhaltendes Aufschäumen), Bodenart: L

bei 100 cm: anstehendes Grundwasser

Abbildung 32: Profil 3 (Zabu)

Foto: Hudribusch (2010)

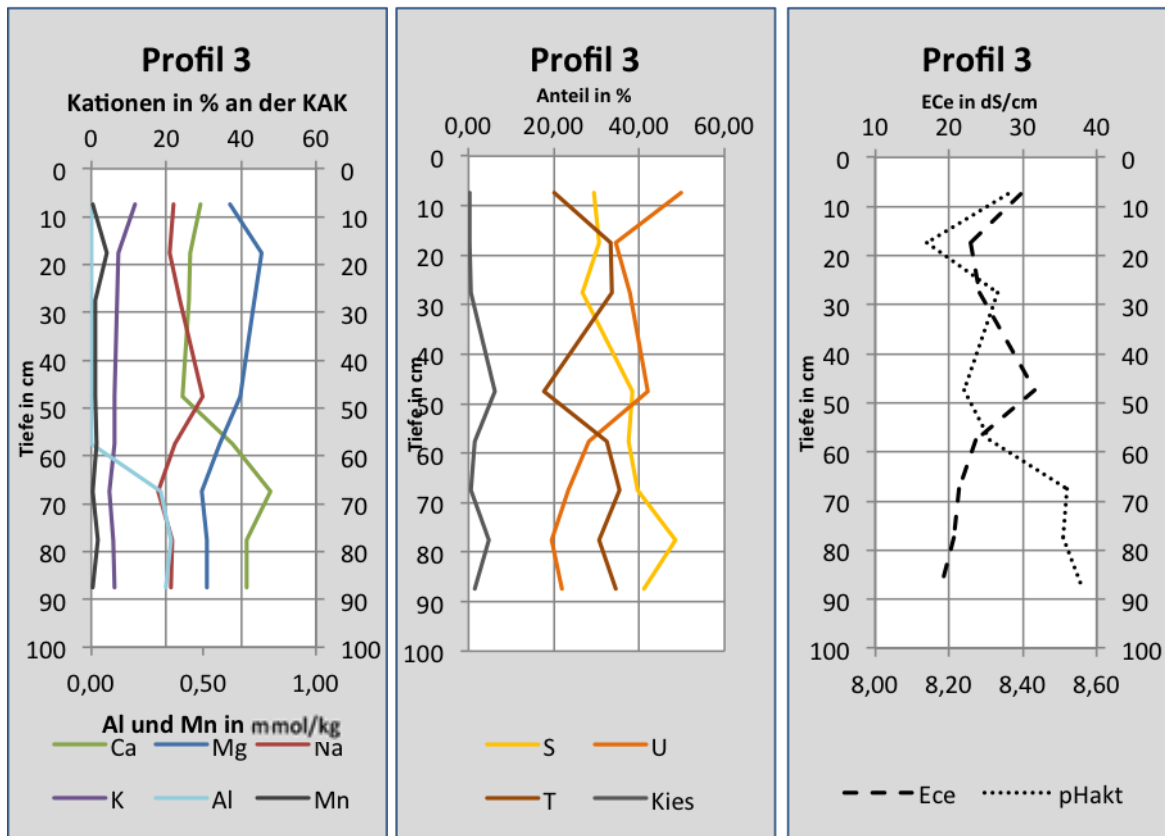


Diagramm 5: Profil 3. links: Kationen- und Anionenverteilung, Mitte: Korngrößenverteilung, rechts: Leitfähigkeit und akt. pH-Wert

5.3.2.2 Profil 4

Profil 4 befindet sich ca. 150 m südwestlich des dritten Profils unter lichtem Palmenbestand mit einer Deckung von 0-10 % und einer Krautschicht von 30-40 % Deckung. Die Palmen sind von Schädlingen befallen; an der Oberfläche fanden sich teilweise Salzkristalle. Der Boden ist mit über 100 cm Tiefe relativ mächtig (das Grundwasser wurde nicht erreicht). Auch dieses Profil hat die Bodenart sandiger bis toniger Lehm. In den oberen 30 cm liegt der Schluffanteil über dem Tonanteil, darunter kehrt sich das Verhältnis um (siehe Diagramm 6). Mit zunehmender Tiefe steigt der pH-Wert leicht an, von 7.9 auf 8.1. Es fanden sich Spuren von Aluminium im obersten Horizont (0.18 mmol/kg) und ab einer Tiefe von 50 cm mit 0.33 mmol/kg. Zwischen 40 cm und 75 cm kommt es vereinzelt zu dunkelgelben Verfärbungen, im untersten Horizont dominiert hingegen ein stagnic Farbmuster, dieser wurde als Gr definiert. Das Ca/Mg-Verhältnis ist bis auf die obersten 20 cm im restlichen Profil sehr eng, und befindet sich zwischen 1.0 und 1.6. Die Leitfähigkeit des Sättigungsextraktes ist mit durchschnittlich 29 dS/m in den obersten 45 cm relativ hoch. Der E_c sinkt im Go auf 27.5 dS/m und steigt im Gor wieder an auf 30.5 dS/m.

Durch den Anstieg des Salzgehalts mit der Tiefe wird dieser Bodentyp als *interner Solonchak* bezeichnet (IUSS Working Group WRB 2007). Konkret handelt es sich um einen **Gleyic Solonchak**.



A (0-5 cm)

Auflagehorizont, TOC=1.9%, stark durchwurzelt mit Feinwurzeln, CaCO_3 : -, Bodenart: sL

B (5-40 cm)

mittlere Durchwurzelung mit Grobwurzeln, wenige 2mm große Kiese,

CaCO_3 : +

Bodenart: L

Go (40-75 cm)

schwach durchwurzelt mit Grobwurzeln,

Al-Konkretionen,

CaCO_3 : +

Bodenart: L

Gor (75-100 cm)

sehr schwach durchwurzelt mit Grobwurzeln,

feuchter,

Al- und Kalkkonkretionen

CaCO_3 : ++, Bodenart: L

Abbildung 33: Profil 4 (Zabu)

Foto: Hudribusch (2010)

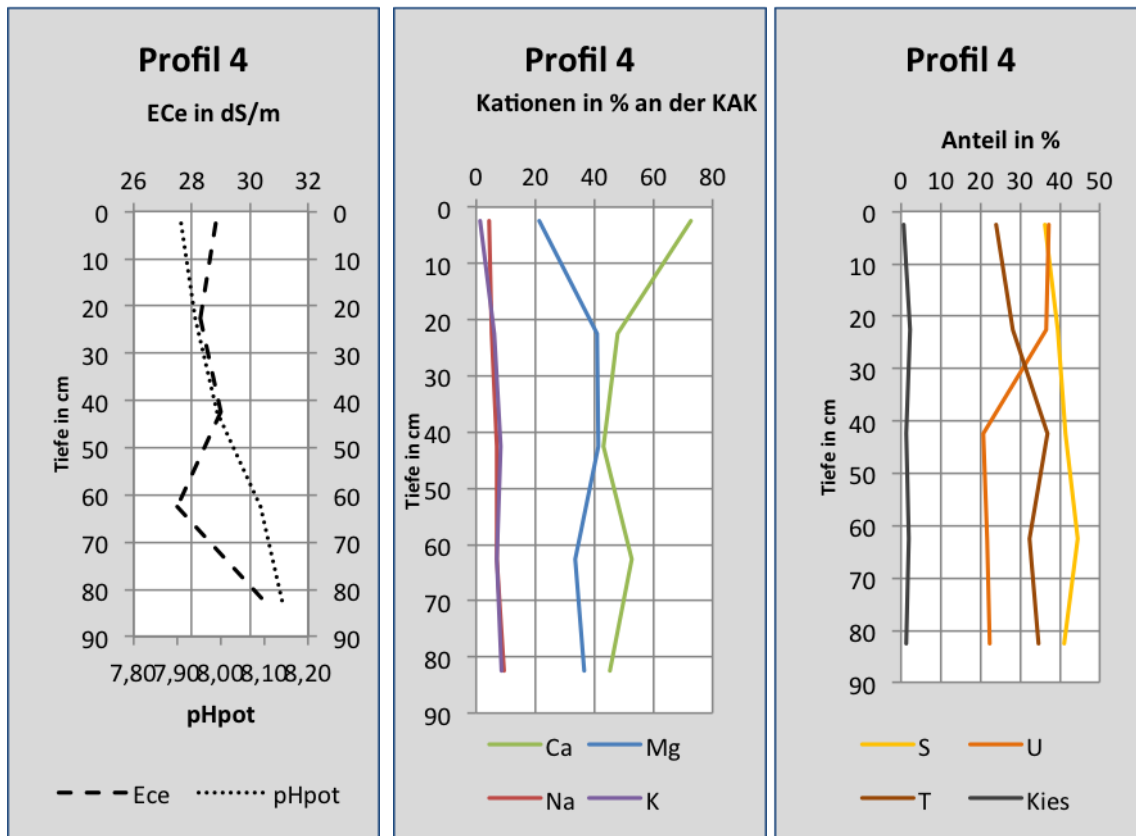


Diagramm 6: Profil 4 (Zabu).

Links: Leitfähigkeit und pH-Wert, Mitte: austauschbare Kationen, rechts: Korngrößenverteilung

5.3.2.3 Profil 5

Dieser Standort befindet sich im dichten Dattelpalmenbestand zwischen den Orten Zabu und Mandiša am westlichen Rand des Teilgebiets. Der Boden ist mit 110 cm relativ mächtig und ist ab einer Tiefe von 60 cm etwas feuchter als darüber. Die Bodenart des gesamten Profils ist Lehm, mit einem durchschnittlichen Tonanteil von 30 % und einem Schluffanteil von 20 % (Diagramm 7). Der pH-Wert liegt zwischen 7.7 und 7.9, die Leitfähigkeit ist mit weniger als 2 dS/m niedrig (Diagramm 7). Auffallend ist die dunkelbraune Färbung des Bodens bis zu einem von Reduktionsfarben dominierten Horizont in 60 cm Tiefe. Die Horizontgrenze verläuft wellenförmig. Die Wurzeldicke nimmt mit der Tiefe zu, wobei der mittlere Horizont am stärksten durchwurzelt ist. Der Anteil austauschbarer Kationen an der KAK verändert sich im Profilverlauf kaum, die KAK nimmt jedoch insgesamt von 214 auf 107 mmol/kg ab. Der TOC reduziert sich in den obersten 40 cm kontinuierlich von 1.26 % auf 0.35 %, und bleibt dann annähernd konstant bei ~0.24 %.



A (0-5 cm): geringmächtiger
Auflagehorizont mit
TOC=1.26%, CaCO_3 : -,
Bodenart: L

B (5-50/60 cm):
braun gefärbt, tonreich,
stark durchwurzelt
 CaCO_3 : --,
Bodenart: L

Bg (50/60-110 cm):
grau-braun,
Reduktionsmerkmale,
tonreich,
leicht durchfeuchtet,
mittlere Durchwurzelung
 CaCO_3 : +
Bodenart: L

Abbildung 34: Profil 5 (Zabu)

Foto: Hudribusch (2010)

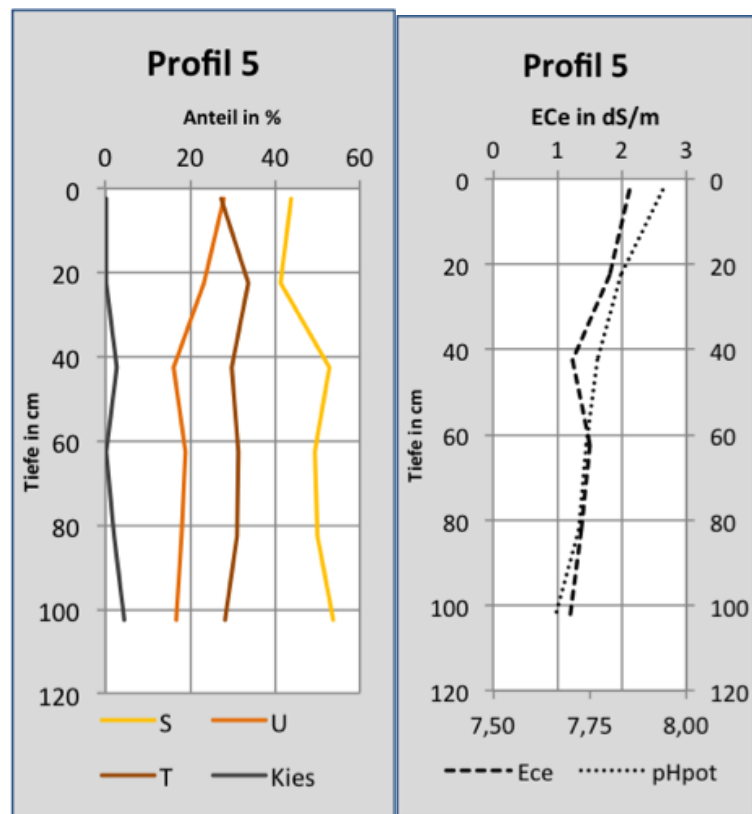


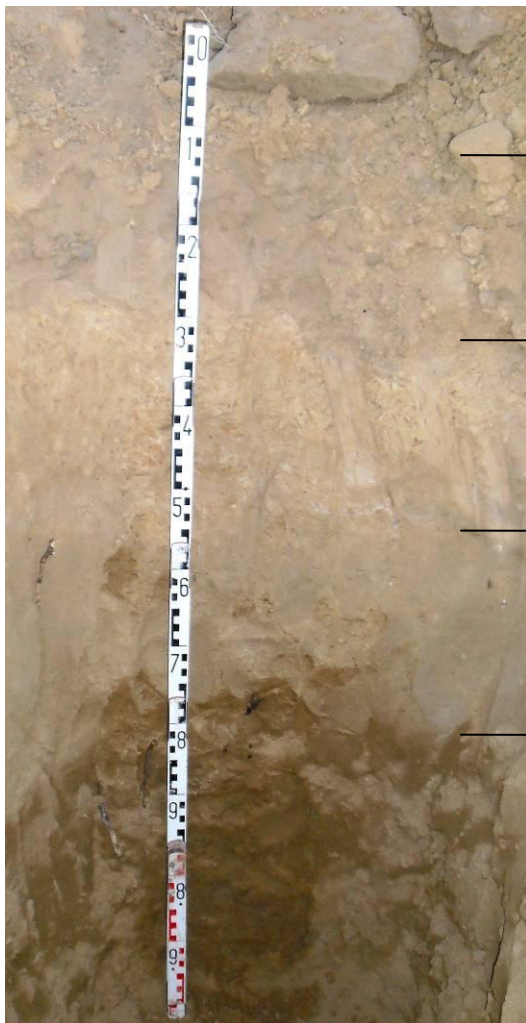
Diagramm 7: Profil 5 (Zabu).

Links: Korngrößenverteilung, rechts: Leitfähigkeit und pH-Wert

Der Boden hat kein deutlich ausgeprägtes Aggregatgefüge, zeigt jedoch eine schwache Carbonatauswaschung, wie sie für Cambisole typisch ist. Der braun gefärbte Horizont ist nicht durch hohe TOC-Gehalte charakterisiert, was auf einen mollic Horizont hinweisen würde. Diese Faktoren definieren den Boden als **Endogleyic Cambisol (Eutric)**.

5.3.3 Teilgebiet Quasaa

5.3.3.1 Profil 6



Ap (0-10 cm):

bearbeitet, locker gelagert, kaum durchwurzelt, OS=0.48%, sehr sandig

A1 (10-30 cm):

hart, trocken, keine Wurzeln, sehr sandig, OS=0.3%

A2 (30-56 cm): sehr hart und trocken, hellere Färbung als A1, keine Wurzeln, sandig

Sw (56-84 cm):

Reduktionsfarben, feucht

Swd (84-120):

hydromorph, hohe Tongehalte, vereinzelt dicke Wurzeln

(vermuteter Sd ab 120 cm Tiefe)

Abbildung 35: Profil 6 (Quasaa)

Foto: Hudribusch (2010)

Dieses Profil befindet sich auf einem Acker, der für den Anbau von Feldfrüchten vorbereitet und bewässert wurde. Die Deckung der Krautschicht beträgt 20-30 %, es gibt keine Strauch- oder Baumschicht.

Das Profil wird durch einen hohen Sandanteil über 80 % charakterisiert (siehe Diagramm 8), was für einen Arenosol typisch wäre, jedoch ist der Anteil an organischer Substanz mit >0.2% in den obersten 20 cm zu hoch. Bis in eine Tiefe von 84 cm dominieren Reduktionsfarben, darunter kommt es zu einer Farbveränderung und einem abrupten Bodenartenwechsel. Durch diesen deutlichen Anstieg des Ton- und Schluffgehalts, kann dieser Horizont als Argic Horizont nach der WRB-Klassifikation angesprochen werden kann (IUSS Working Group WRB

2007). Der Horizont ist reich an austauschbaren Kationen (Diagramm 8a), hier v. a. Mg, und zeigt einen höheren pH-Wert (Diagramm 8). Die EC_e ist etwas niedriger als im darüber liegenden Horizont, da hier der niedrigere Multiplikationsfaktor für Lehm bei der Berechnung der EC_e zum Tragen kommt. Der tonreiche Stauhorizont sowie die Reduktionsfarben darüber, führen zu der Definition des Bodens als **Luvic Planosol (Arenic)**.

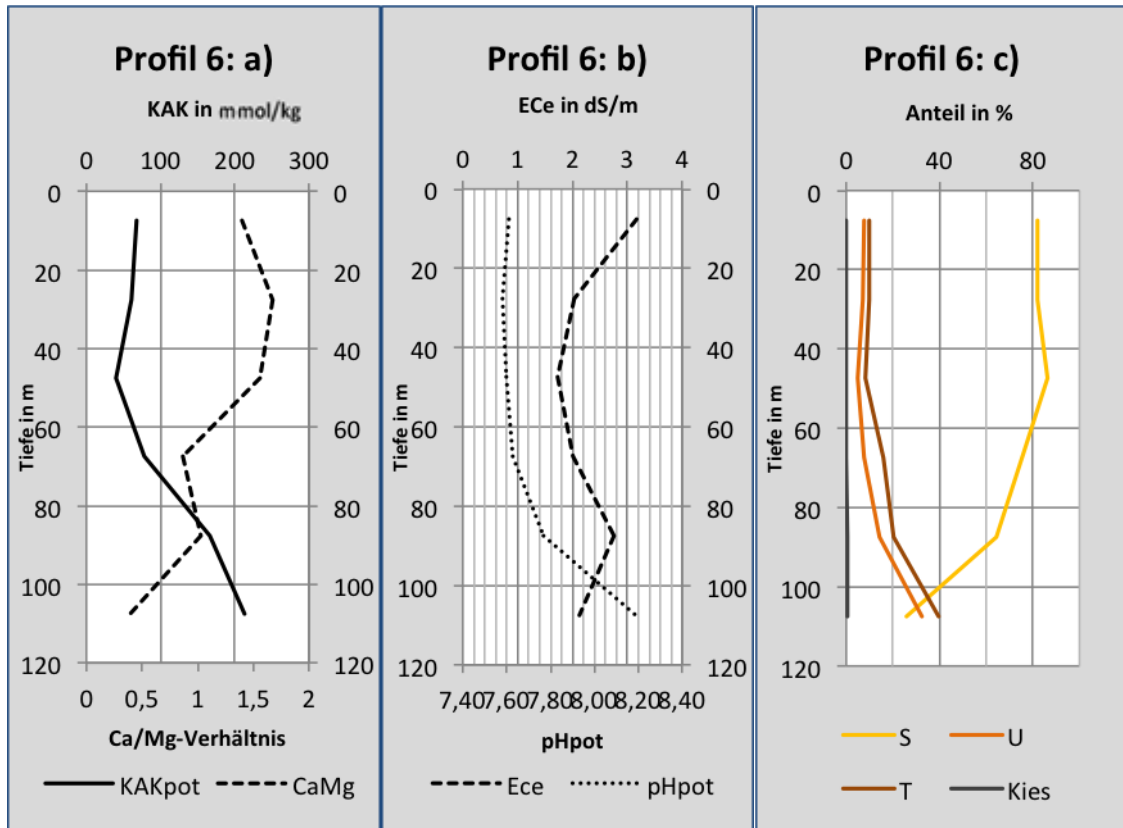


Diagramm 8: Profil 6. a) Verteilung von KAK und Ca/Mg-Verhältnis, b) Verlauf von Leitfähigkeit und pH-Wert, c) Korngrößenverteilung

5.3.4 Teilgebiet Bawiti

5.3.4.1 Profil 7



Az (0-15 cm)

Auflagehorizont,
gut durchwurzelt mit mittelgroßen Wurzeln,
sehr locker gelagert,
Salzausfällungen an der Oberfläche
Bodenart: IS

Goz (15-35 cm)

mittlere Durchwurzelung, Grobwurzeln,
Bodenart: IS
CaCO₃: +

Gor (35-60 cm)

schwach durchwurzelt, Grobwurzeln
feucht-nass
Bodenart: sL

Abbildung 36: Profil 7 (Bawiti)

Foto: Hudribusch (2010)

Profil 7 befindet sich in lichtem Palmenbestand in der Nähe des Drainagegrabens auf 92 m ü. NN. Die Grundwasseroberfläche befindet sich 60 cm unter der Geländeoberkante. An der Oberfläche sind Salzausfällungen sichtbar. Im Labor wurde ein EC von 5.54 dS/m im obersten Horizont gemessen, was bei der Bodenart lehmiger Sand einem sehr hohen EC_e von 94 dS/m entspricht. Die Leitfähigkeit nimmt mit der Tiefe kontinuierlich auf 9.4 dS/m ab (Diagramm 9). Der pH-Wert liegt zwischen 8.2 im obersten Horizont und 7.8 im untersten. Die KAK ist mit 626 mmol/kg im A-Horizont ebenfalls sehr hoch, sinkt jedoch zwischen 35 und 50 cm Tiefe auf 194 mmol/kg ab. Mit bis zu 89% an der KAK dominiert Ca im Go-Horizont (Diagramm 9). Die Korngrößenverteilung entspricht der Bodenart lehmiger Sand und verändert sich im Profilverlauf minimal zu sandigem Lehm im Gor-Horizont. Es handelt sich um den Bodentyp **Hypersalic Gleyic Solonchak**.

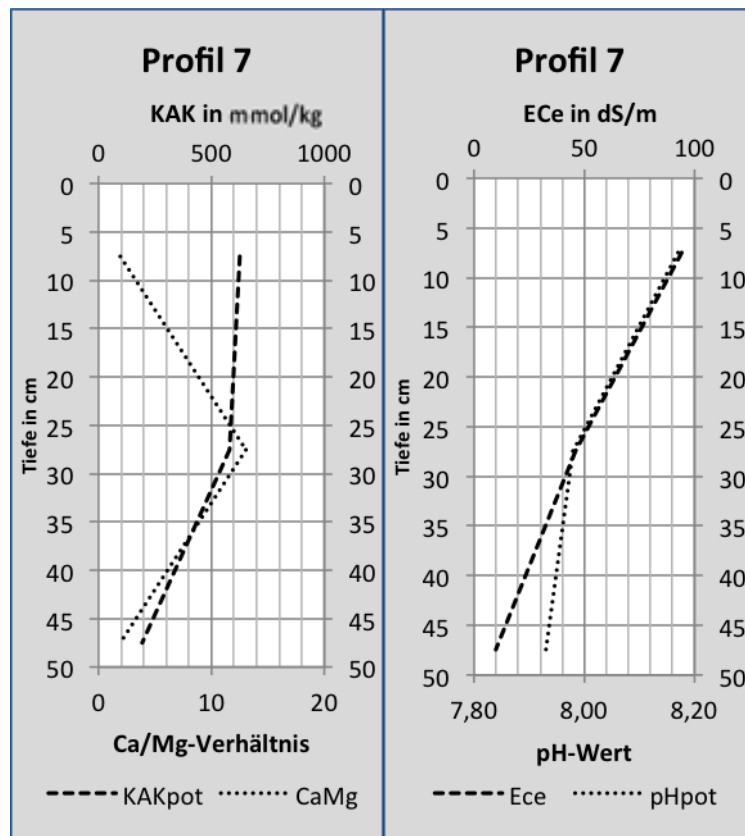


Diagramm 9: Profil 7 (Bawiti).

Links: KAK und Ca/Mg-Verhältnis, rechts: Leitfähigkeit und pH-Wert

5.2.4.2 Profil 8

Das Profil befindet sich etwa 130 m nördlich von Profil 7 und weist viele Ähnlichkeiten auf. Allerdings waren keine Salzausfällungen zu erkennen, und die im Labor gemessene Leitfähigkeit ist mit 11 dS/m in den obersten 10 cm wesentlich niedriger. Sie steigt jedoch mit der Tiefe auf 31 dS/m und 52 dS/m im untersten Horizont an (Diagramm 10). Die Bodenart ist sL in den obersten Horizonten, IS im untersten Horizont. Der Schluffanteil ist wie in Profil 7 mit durchschnittlich 30 % relativ hoch. Die KAK_{pot} hat ihr Maximum im Go-Horizont mit 395 mmol/kg. Wie auch Profil 7 ist dieses ebenfalls sehr locker gelagert. In einer Tiefe zwischen 20 und 25 cm beträgt die Lagerungsdichte lediglich 0.93 cm^3 . Aufgrund des Salzmaximums in der Tiefe spricht man hier von einem internen Solonchak (im Vergleich zum externen Solonchak des Profils 7). Der Bodentyp ist daher ebenfalls ein **Hypersalic Gleyic Solonchak**. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird dieser Boden bewässert. Werden die Salze dabei ausgewaschen, handelt es sich um einen Hydragric Gleyic Anthrosol.



A (0-10 cm)

mittlere
Durchwurzelung, Mittel-
und Feinwurzeln

Go (10-27 cm)

starke Durchwurzelung,
Grobwurzeln

CaCO₃: +

Gor (27-45 cm)

starke Durchwurzelung,
Grobwurzeln

darunter anstehendes
Grundwasser

Abbildung 37: Profil 8 (Bawiti)
Foto: Hudribusch (2010)

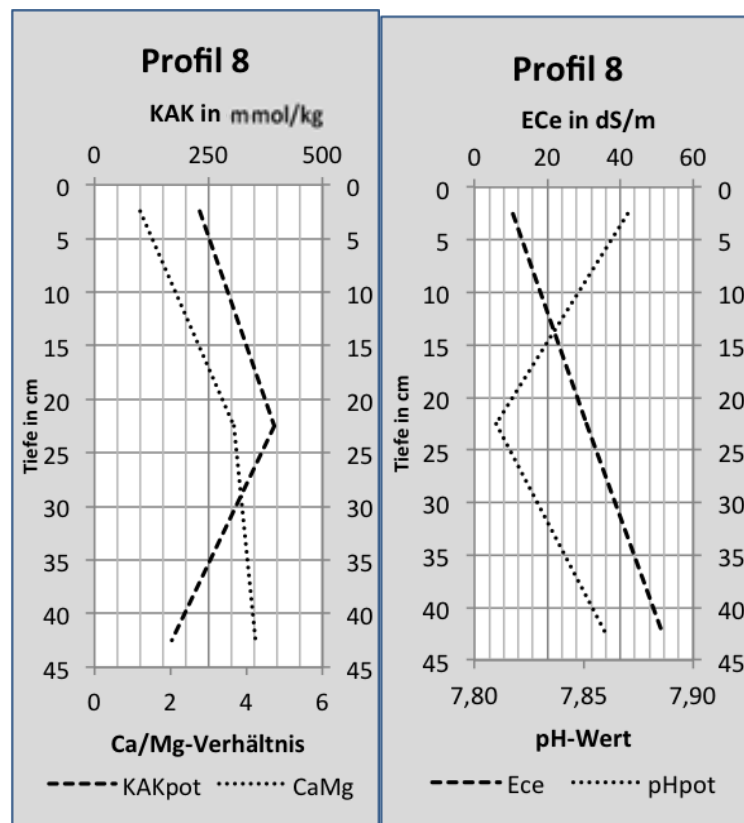


Diagramm 110: Profil 8 (Bawiti).

Links: KAK und Ca/Mg-Verhältnis, rechts: Leitfähigkeit und pH-Wert

5.3.4.2 Profil 9



Ahz (0-5 cm) Brandhorizont

Bodenart: sL

BvSw (5-30 cm)

Bodenart: sL

mittlere Durchwurzelung, Mittelwurzeln

Sw (30-60 cm)

Bodenart: L

schwache Durchwurzelung, Grobwurzeln

SwSd (60-76 cm)

schwache Durchwurzelung, Grobwurzeln

Bodenart: sL

Abbildung 38: Profil 9 (Bawiti)

Foto: Hudribusch (2010)

Profil 9 befindet sich im Zentrum der Oase Bawiti auf einer Höhe von 100 m ü. NN. Der Boden ist dicht mit wilden Kräutern und Gräsern bewachsen. Der oberste Horizont besteht aus einer etwa 2 bis 4 cm mächtigen Aschelage. Der Anteil organischen Kohlenstoffs ist mit 5.3 % dementsprechend hoch. Der Horizont ist auffallend locker gelagert mit einer Dichte von 0.8 g/cm^3 . Er zeigt außerdem eine hohe Leitfähigkeit ($\text{EC}_e = 26.2 \text{ dS/m}$) und eine hohe KAK ($\text{KAK}_{\text{pot}} = 283 \text{ mmol/kg}$). Als diagnostischer Salic Horizont hat er jedoch eine zu geringe Mächtigkeit. Ton und Schluffanteil konnten in dieser Probe nicht gemessen werden. Die darunter liegenden Horizonte zeigen ein Stagnic Farbmuster, d.h. eine Fleckung, die durch zeitweise Wassersättigung und die daraus resultierenden Reduktions- und Oxidationsvorgänge entsteht (IUSS Working Group WRB 2007). Die Bodenart wechselt zwischen 50 und 70 cm Tiefe von sandigem Lehm zu Lehm (Diagramm 11):

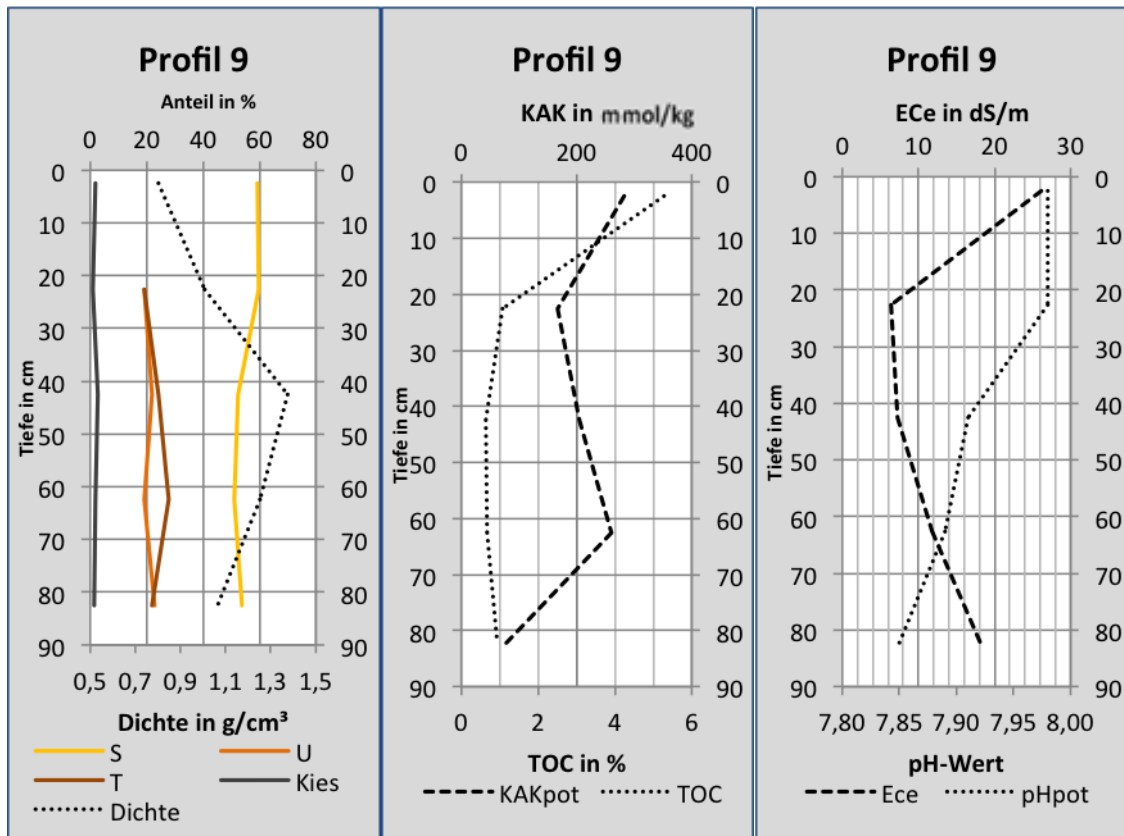


Diagramm 121: Profil 9 (Bawiti).

Links: Korngrößenverteilung und Dichte, Mitte: KAK und TOC, Rechts: Leitfähigkeit und pH-Wert

In diesem Bereich steigt die zuvor abgeschwächte KAK wieder auf 261 mmol/kg an (Diagramm 11). Der Mn-Gehalt steigt bis zu dieser Tiefe auf 0.07 mmol/kg an, und war z.T. in Konkretionen erkennbar. Der Boden zeigt ein Krümelgefüge und eine relativ geringe Lagerungsdichte, die in einer Tiefe von 40 cm etwas zunimmt (Diagramm 11). Spuren von Verwitterung deuten auf ein älteres Bodenmaterial hin. Die Leitfähigkeit nimmt mit der Tiefe wieder zu, und erfüllt hier die für einen Salic Horizont notwendigen diagnostischen Kriterien. Es handelt sich daher um einen **Endosalic Stagnic Cambisol (Sodic, Alcalic)**.

5.4 Clusteranalyse

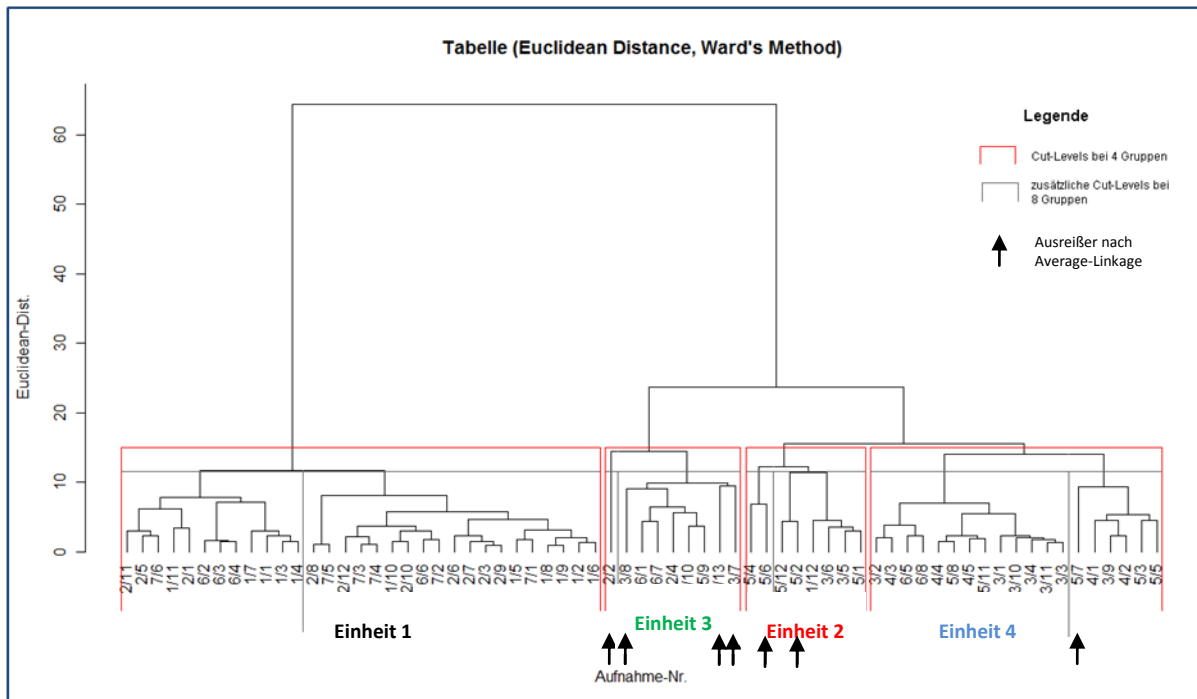


Abbildung 39: Dedrogramm der Clusteranalyse nach Ward's Method

Der vorliegende Datensatz ergab beim Average-Linkage-Verfahren den höchsten kophenetischen Korrelationskoeffizienten (Vergleich der ursprünglichen Matrix mit der Distanzmatrix) mit $\text{cor} = 0.9$. Jedoch wurden bedingt durch eine große Zahl an Ausreißern viele kleine Cluster gebildet. So wurden selbst bei acht Clustern noch sieben davon durch einzelne Objekte repräsentiert. Der kophenetische Korrelationskoeffizient der Ward-Methode fiel mit $\text{cor} = 0.4$ relativ gering aus, lieferte jedoch ein praktikables Ergebnis. Die Signifikanz war mit $p < 0.000$ dennoch sehr hoch. Um die Ausreißer nicht zu ignorieren, wurden sie im Dendrogramm mit Pfeilen markiert und in die Diskussion eingebunden.

Der größte Cluster (Einheit 1) enthält keine Ausreißer. Die Entscheidung, die Clusterbildung auf vier Einheiten zu beschränken, wurde aufgrund der Größe von Einheit 1 getroffen. Diese wird erst bei einem Cut-Level von 12 (entspricht 8 Clustern) in zwei Cluster unterteilt. Es steht also einer sehr homogenen Gruppe von Objekten eine beinahe gleich große, heterogene Gruppe gegenüber. Abbildung 40 macht das deutlich.

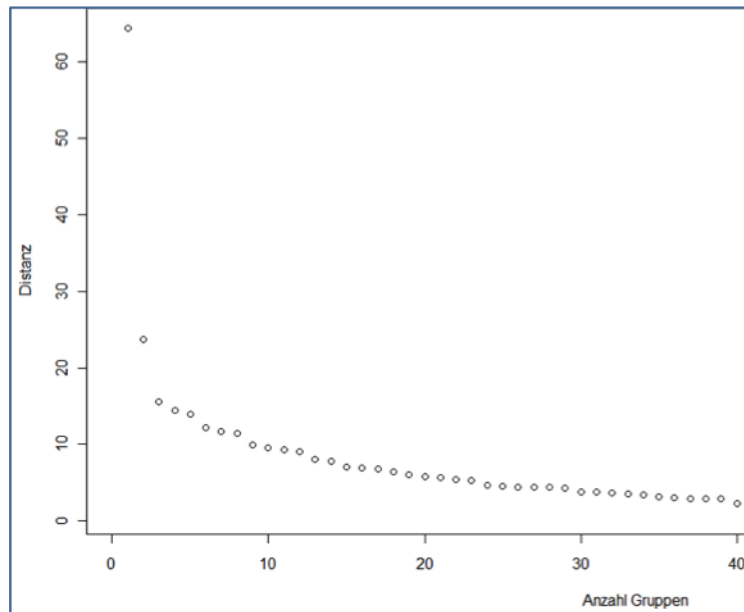


Abbildung 40: Niveau der Fusionslevel für die obersten 40 Fusionierungspunkte des Dendrogramms

Nach den ersten beiden Fusionslevels erfolgt nach 3 weiteren Clustern der nächste Sprung. Cluster 5 besteht nur aus einer Fläche (2/2), es wurde daher nach 4 Clustern „geschnitten“. Der nächste noch gut erkennbare Sprung erfolgt nach 8 Clustern, danach bestehen kaum mehr Niveauunterschiede zwischen den Fusionslevels. Mit den neu gewonnenen Informationen der Gruppenzugehörigkeit wurde ein Säulendiagramm erstellt:

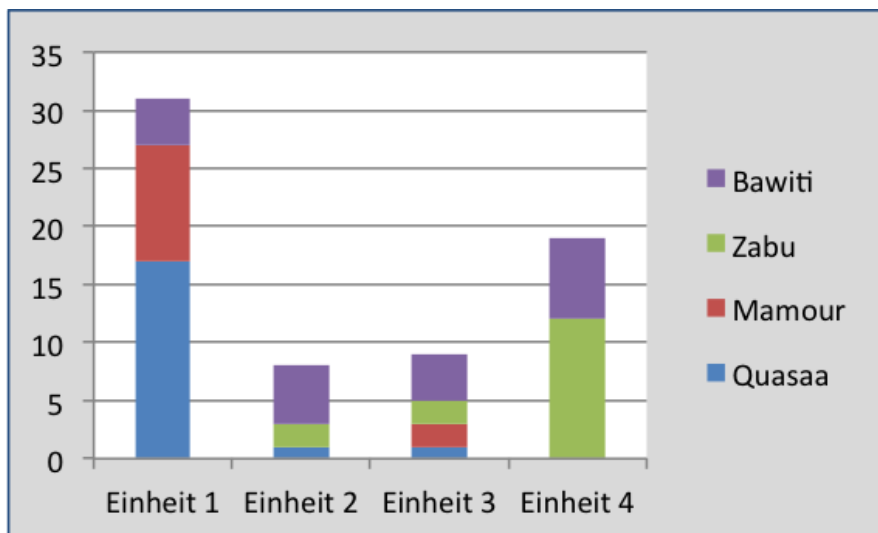


Diagramm 132: Anteil der Teilgebiete in den Einheiten der Clusteranalyse (Angaben in absoluter Häufigkeit)

Es zeigt den Anteil der Teilgebiete in den Einheiten der Clusteranalyse. Einheit 1 wird zu beinahe 60 % vom Teilgebiet Quasaa gebildet, Einheit 2 zu etwas mehr als 60 % durch das

Teilgebiet Bawiti, Einheit 4 besteht nur aus Untersuchungsflächen der Oasen Zabu und Bawiti. Nur Einheit 3 zeigt ein etwas heterogenes Bild und wird von allen Teilgebieten repräsentiert.

5.5 Ordination

5.5.1 Kanonische Korrespondenzanalyse

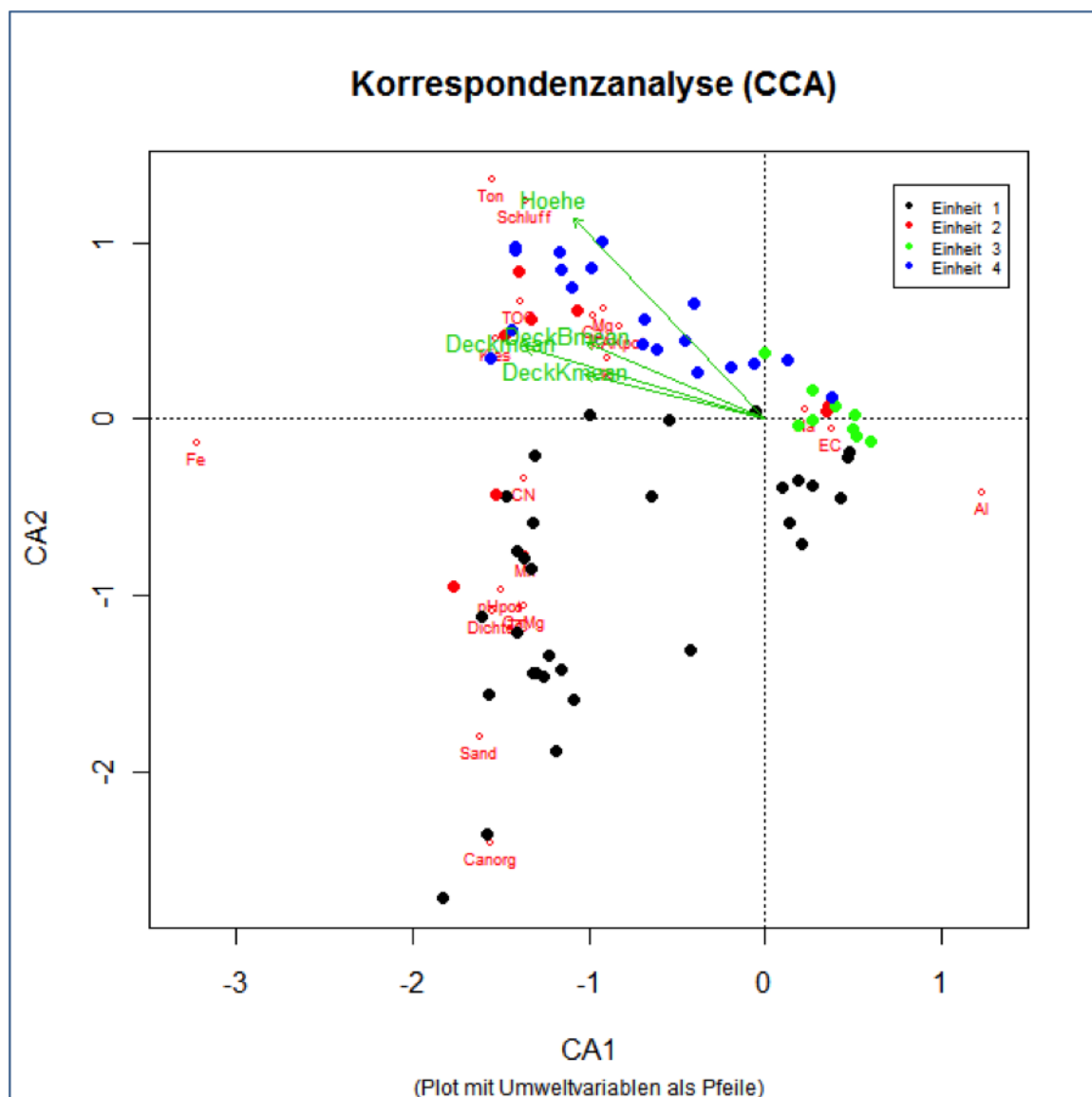


Abbildung 41: Ergebnis der CCA. Farbliche Darstellung der Objekte nach Clustern. Die grünen Vektorpfeile repräsentieren die Umweltvariablen mit signifikantem Einfluss ($p < 0.05$). Die Bodenvariablen sind rot mit Labels eingezeichnet.

Bei der CA erfolgt der Rechenprozess über wechselweise Berechnung der gewichteten Mittel (GM). D.h. es werden für eine Variable (Gradient) gewichtete Mittel der Objekte berechnet, und danach die Tabelle nach dem GM sortiert. Ähnliche Objekte stehen nun nahe beieinander. Die Korrespondenzanalyse sucht denjenigen Gradienten, bei der die Objekte am deutlichsten sortiert werden. Dieser Prozess wird mit allen Variablen durchgeführt, bis keine nennenswerten Veränderungen in der Tabellenstruktur mehr stattfinden. Der Prozess wird als *reciprocal averaging* bezeichnet (LEYER 2007, nach HILL 1973). Diese erste Iteration führt zu einer ersten Achse, die meist einen großen Anteil der Variation erklärt. Um Restvarianzen zu erklären, werden mehrere Achsen gebildet, die unkorreliert zueinander stehen. Die durch die jeweilige Achse erklärte Varianz wird als sog. Eigenwert angegeben. Nach LEYER (2007) ist „die Summe aller Eigenwerte der CA ein Maß für die Gesamtvarianz“. Die Eigenwerte der DCA sind in Tabelle 10 dargestellt:

Tabelle 9: Eigenwerte der DCA-Achsen

	DCA1	DCA2	DCA3	DCA4
Eigenvalues	0.179	0.064	0.043	0.058
Decorana values	0.179	0.042	0.010	0.007
Axis lengths	1.110	0.948	0.851	0.901

Die Achsenlängen sind relativ gering. Es wird empfohlen, bei einer Achsenlänge < 3 lineare Methoden anzuwenden (LEYER 2007, nach LEPSŠ und ŠMILAUER 2003). Es wurde daher für eine bessere Interpretierbarkeit das lineare, direkte Verfahren der Redundanzanalyse gewählt.

5.5.2 Redundanzanalyse (RDA)

Bei der RDA werden die Achsen auf Basis der gewichteten Summen nicht der gewichteten Mittel gebildet. Die Umweltvariablen werden, wie bei der CCA (Abbildung 41) in einem zusätzlichen Schritt als erklärende Variablen in ein multiples lineares Regressionsmodell eingebunden. Es werden wie bei DCA und CA die Objekte so angeordnet, dass eine möglichst große Varianz durch die Gradienten erklärt wird, allerdings müssen diese auch eine Linearkombination der Umweltvariablen darstellen (LEYER 2007).

Die Eigenwerte der ersten 9 Achsen zeigt Tabelle 10:

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
Eigenvalue	6.980	3.058	1.957	1.539	1.260	1.166	0.995	0.722	0.584

Redundanzanalyse (RDA)

PC2

PC1

(Plot mit Zeilen in Prinzipalkoordinaten)

Legend:

- Einheit 1 (black dots)
- Einheit 2 (red dots)
- Einheit 3 (green dots)
- Einheit 4 (blue dots)

Environmental variables (vectors):

- Na, pHpot, Al, EC, K, CN, KAKpot, Mg, Ca, TOC, Schluff, Ton, Hoehe, Dichte, Sand, Canorg, Fe, DeckKmean, Deckmean

Die Aufnahme­flächen sind als Punkte eingezeichnet und nach Clusterzugehörigkeit eingefärbt. Die Quadranten des Koordinatensystems werden von rechts oben beginnend gegen den Uhrzeigersinn als I, II, III und IV bezeichnet. Einheit 1 findet sich im ersten und vierten Quadranten des Koordinatensystems, Einheit 2 im vierten und dritten, Einheit 4 hauptsächlich in Quadrant III und Einheit 3 zu einem Großteil in Quadrant II. Die Flächen sind

ähnlich angeordnet wie bei der CCA, in der Darstellung jedoch diagonal gespiegelt (Quadrant I gegen III, sowie II gegen IV). Die Vektorpfeile als auch die Objektpunkte zeigen eine stärkere Streuung als im Fall der CCA und können daher besser interpretiert werden. So sind beispielsweise jene Flächen, die in hohem Maß durch die EC beeinflusst werden (Einheit 3) deutlicher am Rand des Diagramms zu finden, während der starke Einfluss der EC im unimodalen CCA-Ordinationsdiagramm weniger zur Geltung kommt (vgl. PFEIFER 1999). Dies ist auf die extrem schiefe Verteilung der EC zurückzuführen, die im linearen Modell der RDA deutlicher widergegeben wird. Der Einfluss der Umweltvariablen ist ähnlich. Die Vektorpfeile weisen in beiden Modellen in Richtung der Objekte der Einheiten 2 und 4, wo überdurchschnittliche Werte dieser Variablen zu finden sind (vgl. PFEIFER 1999). Im RDA-Modell ist die Variable *DeckBmean* (mittlere Deckung der Baumschicht) nicht enthalten. Im CCA-Modell fließt sie jedoch als signifikante Variable ein.

6. Diskussion

6.1 Darstellung der Bodenqualität anhand der Leitprofile

Da sich Bodentypen innerhalb sehr kurzer Distanzen ändern können, wurden die Profile auf zuvor beprobten Standorten aufgenommen. Hier lagen bereits Informationen zu Leitfähigkeit, Bodenart und Vegetationsbedeckung vor. Aufgrund von Kommunikationsproblemen wurden im Teilgebiet Bawiti jedoch nicht zuvor beprobte Standorte gewählt. Die Standorte können aufgrund ihrer Vegetation, sowie den unterschiedlichen Höhenlagen und Distanzen zum Drainagegraben dennoch als repräsentativ für das Teilgebiet angesehen werden.

Oasenböden werden häufig dem Bodentyp *Anthrosol* oder *Hydragric Anthrosol* zugeordnet (vgl. IUSS Working Group WRB 2007), was jedoch im Untersuchungsgebiet zu Unterscheidungsschwierigkeiten geführt hätte. Zudem wurden die Kriterien der WRB nur annähernd erfüllt. Die meisten beprobten Böden werden aber selbstverständlich vom Menschen intensiv bearbeitet und bewässert und sind damit im weitesten Sinne Anthrosole. Die Bodentypen der Oasenteile können wie folgt zusammengefasst werden (Tabelle 11):

Tabelle 111: Vorkommen von Bodentypen und Charakteristika nach Teilgebieten

Teilgebiet	Bodentypen	Charakteristika		
Bawiti (Profile 7+8, 9)	Hypersalic Gleyic Solonchak , Endosalic Stagnic Cambisol (Sodic, Alcalic)	sandige und lehmige Böden, verw.	hohe EC	Grundwasserstand zwischen 45 und 60 cm Tiefe. In höheren Lagen unter 80 cm
Mamour (Profile 1, 2)	Gleysol (Arenic), Hypersalic Gleyic Solonchak (Arenic)	sandig, gleyic	Bei nicht bewässerten Böden hohe EC	Grundwasserstand zwischen 50 und 60 cm Tiefe
Zabu (Profile 3, 4, 5)	Hypersalic Gleyic Solonchak (Sodic), Gleyic Solonchak , Endogleyic Cambisol (Eutric)	lehmig, verwittert	hohe EC an tief gelegenen Standorten	Grundwasserstand tiefer als 100 cm unter GOK
Quasaa (Profil 6)	Luvic Planosol (Arenic)	sandig	niedrige EC	Stauhorizont vorhanden

Die für Oasenböden typischen Merkmale wie ein geringer Humusanteil und ein kaum oder gar nicht ausgeprägter B-Horizont (vgl. PFEIFER 1999), sind auch im Untersuchungsgebiet zu

erkennen. Der pH-Wert liegt in allen Böden im alkalischen Bereich und die Basensättigung beträgt nahezu 100 %.

Solonchake sind insbesondere an tiefer gelegenen Flächen mit höherem Grundwasserstand zu finden. Diese Flächen sind teilweise ungenutzt, wie die Salzbrache in Mamour (Standort 2/2), teilweise werden sie auch bearbeitet und bewässert, wie die Solonchake in Bawiti und Zabu. Landwirtschaftlich betrachtet haben salzbeeinträchtigte Standorte jedoch einen geringeren Wert und benötigen zusätzlich zum Pflanzenbedarf Wassergaben und eine gute Drainage (IUSS Working Group WRB 2007). Keines der aufgenommenen Profile zeigt eine Inkrustierung des Bodenmaterials durch Salze, Carbonate oder Gips, wie es auf extremen Solonchaken vorkommen kann (vgl. PFEIFER 1999). Allerdings weisen der verdichtete Unterbodenhorizont in Profil 3 und die erhöhten Aluminium- und EC-Werte auf eine niedrige Standortqualität hin. Der nahegelegene Solonchak bei Profil 4 ist sandiger, besser durchwurzelt und wasserdurchlässiger. Er zeigt auch eine bessere Qualität durch etwas geringere Salzgehalte und weniger Natrium in der Austauschlösung. Die Solonchake Bawitis haben zwar einen höheren Sandanteil, was eine Auswaschung der Salze erleichtert, sind jedoch weniger tiefgründig und dem Einfluss salzhaltigen Grundwassers ausgesetzt.

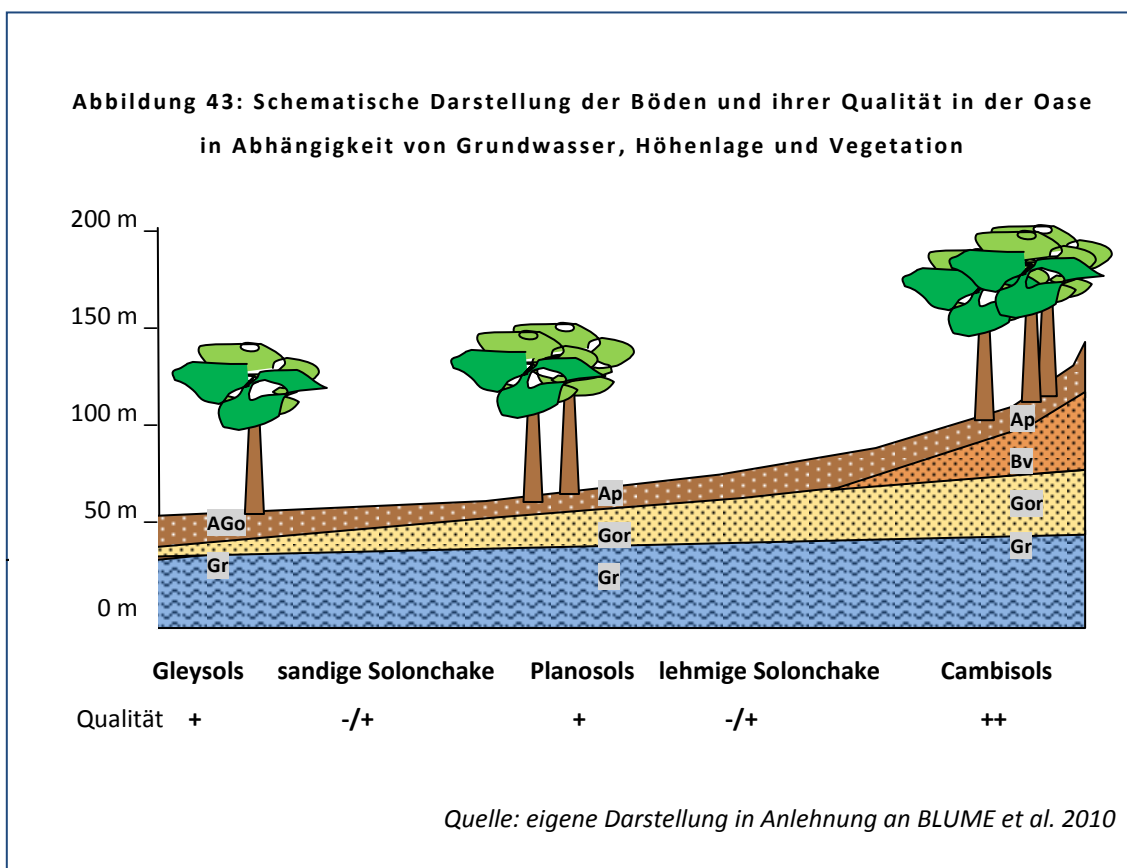
Die **Gleysole** Mamours sind im Grunde Anthrosole, da sie nicht unter natürlichen niederschlagsreichen Klimabedingungen entstanden sind, sondern künstlich bewässert werden. Sie haben jedoch keinen Plaggen-Horizont oder andere organische oder sedimentreiche Lagen. Sie sind sehr sandig und gut durchwurzelt, aber nährstoffarm, und eignen sich daher gut für den Anbau genügsamer Dattelpalmen. Wird jedoch nicht ausreichend bewässert und drainiert, entstehen ausgeprägte Solonchake wie in Profil 2.

Planosole, wie sie in Quasaa vorkommen, haben oft eine geringe Fruchtbarkeit, weswegen selbst bei guter Drainage nur geringe Erträge erzielt werden. Das Wurzelwachstum ist aufgrund von Sauerstoffmangel und der höheren Lagerungsdichte des Unterbodens eingeschränkt (IUSS Working Group WRB 2007). Die Eignung der Fläche zum Gemüseanbau ist daher fraglich. Das Profil in Quasaa wird jedoch gut drainiert, was die Fruchtbarkeit etwas verbessern kann. Der hohe Carbonatgehalt könnte auf Kalkung zurückzuführen sein, wie es häufig bei drainierten Gleysolen praktiziert wird, um ein besseres Milieu für Organismen zu schaffen (IUSS Working Group WRB 2007). Grundsätzlich eignen sich die sandreichen

Standorte Quasaas besonders für den Anbau von Alfalfa (EL SAIED, mündliche Mitteilung 03.2010).

Cambisole kommen in der Oase an höher gelegenen Standorten der Oasen Bawiti und Zabur vor. Sie können für unterschiedlichste Anbauarten genutzt werden. Cambisole mit hoher Basensättigung gehören in den gemäßigten Zonen zu den produktivsten Böden. In ariden Gebieten werden sie zum Anbau von Grundnahrungsmitteln, Ölsaaten, ein- und mehrjähriger Kulturpflanzen, sowie als Weidestandorte genutzt (IUSS Working Group WRB 2007). Diese vielseitige Verwendung der Cambisole wird auf den zentral gelegenen Standorten Bawitis deutlich (insbesondere Standort 5/6). Hier befand sich laut der dort ansässigen Bauern das fruchtbarste Ackerland der Oase. Heute reicht das Wasser aber nicht mehr aus, weshalb sie teilweise in Weideland umgewandelt wurden. Diese Böden werden im Sommer für den Reisanbau, im Winter für den Weizenanbau genutzt.

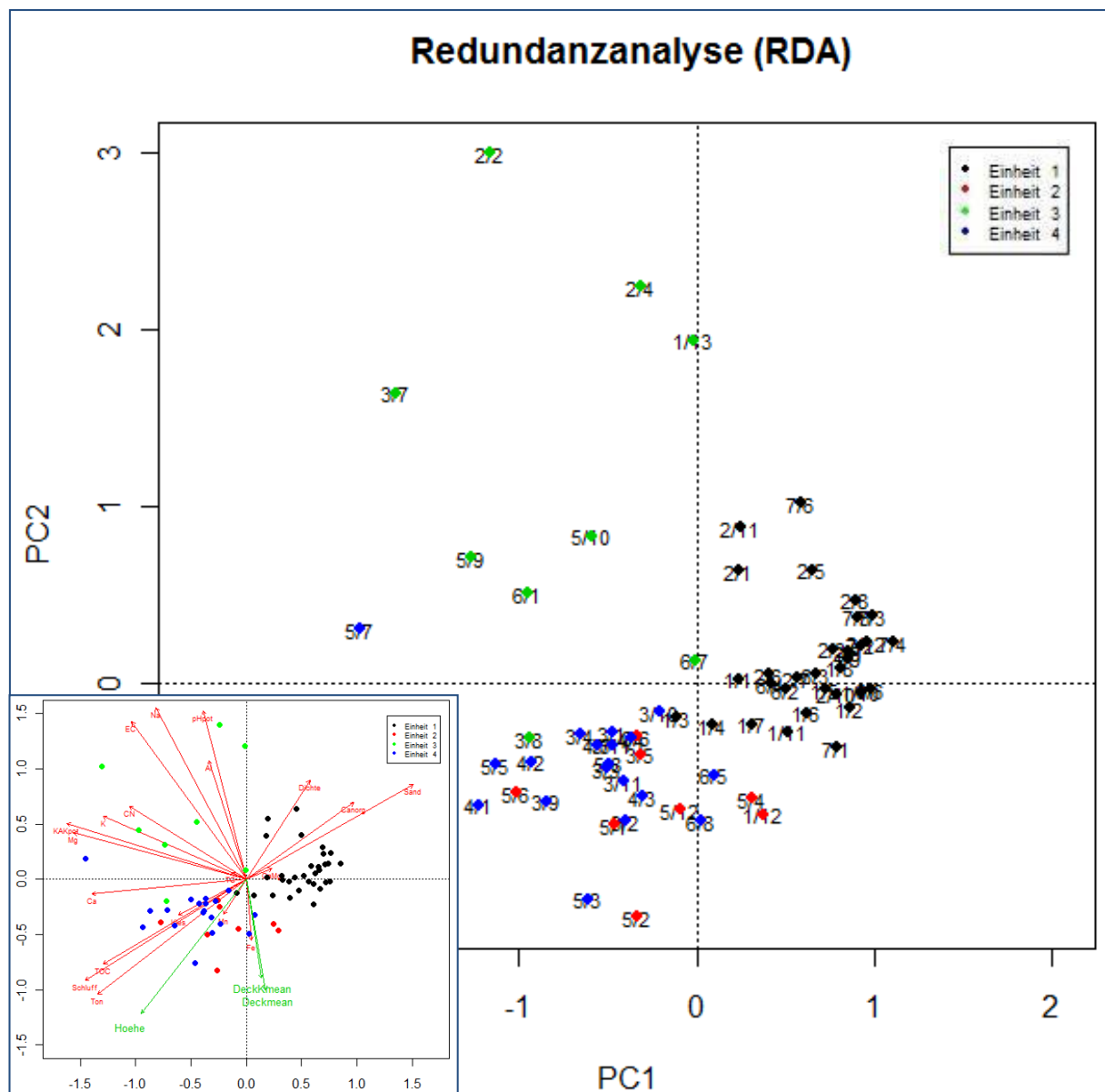
Abbildung 43 zeigt ein Schema der Böden in der Oase in Abhängigkeit von Grundwasser, Höhenlage und Vegetation. Die Höhenangaben verstehen sich als ungefähre Werte. Die Angabe „-/+“ bei der Qualität der Solonchake, bezieht sich auf die unterschiedliche Qualität je nach Bewässerungs- und Drainagebedingungen.



6.2 Interpretation von Clusteranalyse und Ordination

Die Interpretation der Ordination erfolgt anhand des linearen Modells der Redundanzanalyse mithilfe der sog. **Biplot-Regel** nach LEYER (2007). Die Vektorpfeile (siehe Abbildung 42 und Abbildung 44 u. I.) repräsentieren die Boden- bzw. Umweltvariablen. Mit zunehmender Entfernung der Pfeilspitze zum Koordinatenursprung steigen die Variablenausprägungen an. In die andere Richtung, also zum Punkt mit den Koordinaten 0/0 und darüber hinaus, nehmen die Werte ab. Wird nun ein Lot von den Aufnahmestandorten

Abbildung 44: Biplot der RDA. Darstellung mit Labels der Objekte. Unten links: verkleinerte Darstellung der RDA mit Vektorpfeilen (siehe Abb. x)



zu den Variablenpfeilen gezeichnet, erhält man am Schnittpunkt die Ausprägung der Variable am jeweiligen Standort. Nahe beieinander liegende Standorte sind ähnlicher als weit voneinander entfernte. Dasselbe gilt für die Vektoren – je näher sie zusammen stehen, desto höher sind sie korreliert.

6.2.1 Jüngere und ältere Teilgebiete im Vergleich

Wie schon in Kapitel 5.4 angedeutet, werden die Einheiten 1, 2 und 4 der Clusteranalyse von verschiedenen Teilgebieten dominiert (Diagramm 12). So besteht Einheit 1 zu über 80 % aus den Flächen Quasaas und Mamours. Im Biplot sind diese Flächen schwarz eingezeichnet. Sie werden in hohem Maß vom Parameter Sand beeinflusst, welcher wiederum hoch korreliert mit den Parametern anorganischer Kohlenstoff (*Canorg*) und der Lagerungsdichte (*Dichte*). Werden von den Standorten 1/3, 2/2 und 2/4 der Einheit 3 Lotrechte zu den letztgenannten Vektoren gezeichnet, befinden sich deren Schnittpunkte ebenfalls nahe der Pfeilspitze. Auch diese Flächen wurden in Quasaa und Mamour aufgenommen. Unter den Aufnahmen der Einheit 1 finden sich jedoch auch vier Standorte in Bawiti. Sie befinden sich im Biplot zwar näher am Koordinatenursprung, werden aber dennoch von hohem Sandanteil und geringerer Nährstoffverfügbarkeit gekennzeichnet. Die Lagerungsdichte spielt eine untergeordnete Rolle. Drei dieser vier Ausnahme-Standorte Bawitis befinden sich im östlichsten Teil des Gebiets in der Nähe der Verbindungsstraße, wo offenbar vermehrt sandreiche Böden auftreten. Hier könnten die höheren Sandanteile im Oberboden durch mangelnden Windschutz verursacht sein, da zwischen den Oasengärten auch immer wieder ungenutzte, vegetationsarme Flächen zu finden waren. Stärkerer Wind kann Sand aus der nahegelegenen Wüste einbringen und Feinmaterial auswehen (vgl. PFEIFER 1999). Einer der Ausnahme-Standorte gehört zu den jüngeren Anbauflächen nördlich des Drainagegrabens, wo Sandböden die Norm bilden.

In gegensätzlicher Richtung dominieren der organische Kohlenstoff (*TOC*), sowie Schluff und Tongehalt. Standorte, die von diesen Parametern am stärksten beeinflusst werden gehören den Clustereinheiten 2 und 4 an (im Biplot rot und blau). Beide Einheiten bestehen fast ausschließlich aus den Oasenteilen Bawiti und Zabü, mit Ausnahme von Standort 1/12, der sich am äußeren Rand Quasaas befindet. Er hat die Bodenart toniger Sand mit einem Sandanteil von nur 70 % und wird mit Gerste (50-60 % Deckung) bebaut. Der Bauer bewässert etwa 80 h/Monat, was fast der doppelten Bewässerungsdauer der übrigen

Flächen Quasaas entspricht. Standort 3/8, der zu Einheit 3 gehört, könnte ebenfalls von Ton, Schluff und TOC bestimmt sein, was sich bei näherer Betrachtung der Werte aber als Fehlschluss herausstellt. Es handelt sich um den Standort von Profil 4 in Zabú. Die Fläche wird laut Auskunft des Bauers mit chemischem und organischem Dünger bearbeitet, was eine mögliche Erklärung für den sehr hohen Anteil austauschbaren Calciums (370 mmol/kg) sein kann. Als externe Ressource von Kalzium dient zum Beispiel Gips, der oft als günstiger und einfach anzuwendender Dünger genutzt wird (LOVEDAY 1984). TOC, Sand und Ton weichen jedoch nicht von den für das Teilgebiet Zabú üblichen Werten ab.

Die Ähnlichkeit der Einheiten 2 und 4 wird durch die Nähe der Objekte im Ordinationsdiagramm ersichtlich. Die älteren Oasengebiete Zabú und Bawiti lassen sich daher bis auf wenige Ausnahmen anhand der Bodenparameter sehr gut von den jüngeren Gebieten Mamour und Quasaa abgrenzen. Während die Böden der älteren Oasen über die Parameter Ton, Schluff, TOC und Ca definiert werden, sind die jüngeren Oasen hauptsächlich von hohem Sandanteil, Lagerungsdichte und C_{anorg} -Gehalt charakterisiert⁵. Die beinahe entgegengesetzte Richtung des Vektors der KAK weist zudem auf einen Mangel an Nährstoffen in der Austauscherlösung der Sandböden hin. Näheres dazu in Kap. 6.4.1.

6.2.2 Die Extremstandorte der Oase

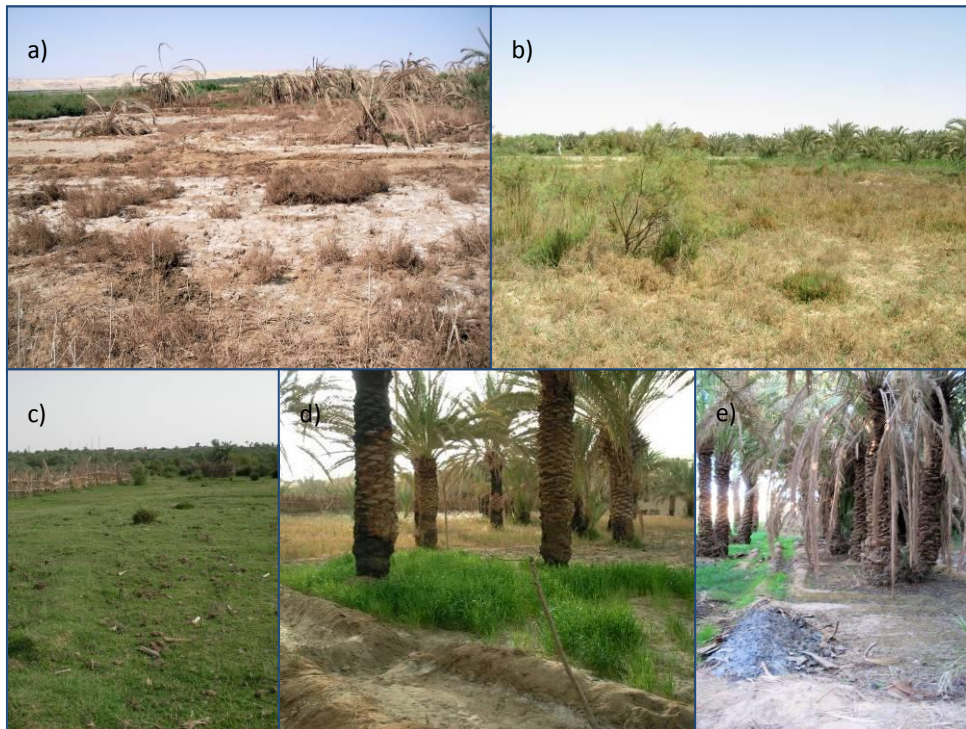
Die dritte Clustereinheit (grün) befindet sich zum größten Teil in Quadrant II. Die Objekte liegen jedoch weit auseinander und sind damit sehr heterogen. Es können zwei Variablengruppen identifiziert werden. Die erste Gruppe besteht aus der Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}), den Kationen Mg und K sowie dem Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (CN). Die Flächen 5/7, 5/9 und 6/1 können dieser Gruppe zugeordnet werden. Die zweite Gruppe setzt sich aus den hoch korrelierten Variablen EC, Na, Al und pH_{pot} zusammen. 2/2, 2/4, 1/13 und 5/10 können hier zugeordnet werden. Zusätzlich korrelieren die Flächen 2/1, 2/11 und 7/6 aus Einheit 1 stark mit dem pH-Wert.

⁵ Sandböden zeigen i. a. eine höhere Lagerungsdichte aufgrund der kompakteren Struktur der Sandkörner. Die kritische Lagerungsdichte von 1.8 g/cm³ wird jedoch nicht überschritten (vgl. HAZELTON & MURPHY 2007).

Am deutlichsten werden die Flächen der Einheit 3 vom zentralen Vektor der Leitfähigkeit beeinflusst. Die Reihenfolge von hoher zu niedriger EC ist: $2/4 > 3/7 > 2/2 > 5/7 > 5/9 > 5/10 > 6/1 > 2/1$. Es sind also alle Teilgebiete außer Quasaa vertreten⁶.

- *Mamour*: Fläche 2/4 ist jener aufgegebene Standort mit Salzausblühungen, der dem Al-Mamour-See am nächsten liegt (Abbildung 45, Foto a). Fläche 2/2, der Standort von Profil 2, ist eine seit 30 Jahren nicht mehr bewirtschaftete Brache mit Salzzeigern (Abbildung 45, Foto b). 2/1 ist ein erst kürzlich aufgegebener Standort mit 40-50 % Deckung an Dattelpalmen (Abbildung 45, Foto e). Er gehört eigentlich zu Einheit 1.

Abbildung 45: a) Standort 2/4, Mamour; b) Standort 2/2, Mamour; c) Standort 5/7, Bawiti; d) Standorte 5/9 und 5/10 (Hintergrund), Bawiti; e) Standort 2/1, Mamour. [Anm.: zu den Standorten 3/7 und 6/1 sind keine Fotos vorhanden]



eigene Fotos

- *Zabu*: Fläche 3/7 ist eine Brache, die dicht mit Gräsern und Salzzeigern bewachsen ist.
- *Bawiti*: Standort 5/7 ist eine abgegraste Weide im zentral-nördlichen Bereich Bawitis, er gehört Einheit 4 an (Abbildung 45, Foto c). Die Standorte 5/9 und 5/10 liegen nebeneinander, nördlich des Drainagegrabens. Sie werden mit Drainagewasser

⁶ Die Bezeichnung der Untersuchungsflächen erfolgte in der Form „Aufnahmetag/Lfd. Nr.“. Für Quasaa waren die Aufnahmetage 1 und 7, für Mamour 2, für Zabu 3 und 4, für Bawiti 5 und 6.

bewässert (Rillenbewässerung). 5/9 wird für den Anbau vorbereitet, 5/10 ist mit 10 % Deckung von Palmen besiedelt und wird sonst nicht bewirtschaftet (Abbildung 45, Foto d). Fläche 6/1 befindet sich auch in der Nähe des Drainagegrabens und wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls mit Drainagewasser bewässert.

Die Clustergruppe 3 markiert demzufolge die extremen Standorte der Oase, deren Salzgehalte deutlich über dem Medianwert liegen, mit Ausnahme der Standorte 6/7 und 3/8, die offenbar aus anderen Gründen in diese Einheit fallen. Es können außerdem Standorte ausgemacht werden, die eher durch hohen Na-Gehalt und pH-Werte charakterisiert werden, wie es für Solonetze typisch ist (IUSS Working Group WRB 2007) und solche, die von hoher KAK und hohen C/N-Verhältnissen geprägt sind. Wie Abbildung 45 deutlich macht, unterscheiden sich die extremen Salzstandorte sehr voneinander. Es finden sich jedoch Gemeinsamkeiten: alle Standorte bis auf 3/7 und 3/8 in Zabu befinden sich auf einer Höhe < 100 m ü. NN. und haben keine oder eine geringe Deckung der Baumschicht, die 30 % nicht überschreitet. Standort 2/1 mit 40-50 % Deckung bildet hier die Ausnahme. Auf den Einfluss der Umweltvariablen wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

6.3 Der Einfluss der Umweltparameter auf die Bodenqualität

6.3.1 Deckung und Höhenlage

Die für die Ordinationsanalyse einbezogenen Variablen waren die mittlere Deckung von Baum-, Strauch- und Krautschicht, die mittlere Deckung insgesamt, sowie Höhe und Geländeneigung. Signifikant gingen die Variablen mittlere Deckung (*Deckmean*), mittlere Deckung Krautschicht (*DeckKmean*) und Höhe in die Redundanzanalyse ein. Bei der Berechnung der CCA erwies sich auch die Deckung der Baumschicht als signifikant einfließende Umweltvariable (Abbildung 41).

Die mittlere Deckung ist mit der Deckung der Krautschicht hochkorreliert, wie bereits in den Boxplots deutlich wurde. Die Krautschicht hat den größten Anteil an der Gesamtdeckung. Im Biplot der RDA weisen die Pfeilspitzen der Deckung in die der EC entgegengesetzten Richtung. Dies lässt den Schluss zu, dass eine geringere Vegetationsbedeckung höhere EC-

Werte und damit höhere Salzgehalte in den Böden bedingt. Diese negative Korrelation gilt in besonderem Maß für die Gruppe der stark alkalischen und natriumbeeinflussten Böden. Die Vegetationsbedeckung weist keine eindeutige Objektgruppe aus. Der Pfeil verläuft zwischen der Clustergruppe 1 auf der einen Seite und den Gruppen 2 und 4 auf der anderen Seite, jedoch mit einer deutlicheren Korrelation zu den letzteren. Bei dem Vergleich mit der Datengrundlage, stellte sich heraus, dass die dem Deckungspfeil nahe stehenden Flächen keineswegs jene, mit der höchsten Deckung sind. Die Flächen mit den höchsten Werten finden sich beiderseits des Vektors, in den dichten Punktwolken der Einheiten 1 und 4. Diese Umweltvariable ist daher an sehr unterschiedlichen Standorten stark ausgeprägt, was sich in einer wenig aussagekräftigen Pfeilrichtung niederschlägt.

Anders verhält es sich bei dem Umweltparameter Höhe ü. NN. Dieser Vektorpfeil erklärt einen Großteil der Varianz der Einheiten 2 und 4, also der Teilgebiete Zabو und Bawiti. Nach PFEIFER (1999) kann die Korrelation zwischen Höhenlage und Tongehalt der Böden auf die intensivere und längere Bewässerung in den älteren Oasenteilen zurückzuführen sein. Die dadurch entstandenen ausreichend humiden Bedingungen können die Verwitterung der Körner begünstigt haben.

6.3.2 Bewässerung und Wasserqualität

Nach LEYER (2007) besteht ein Problem der direkten Gradientenanalyse darin, dass der Großteil der Variation in den Standorten möglicherweise unerkannt bleibt, wenn die ausschlaggebenden Umweltvariablen nicht erhoben wurden. Aufgrund der geringen Zahl an signifikanten Umweltvariablen und ihrer mäßigen Aussagekraft, bleibt also die Frage offen, welche Umweltvariablen für die Verteilung tatsächlich verantwortlich sind. Darüber kann möglicherweise ein Blick auf die Informationen zu Bewässerung und Wasserqualität Aufschluss geben (Diagramm 13).

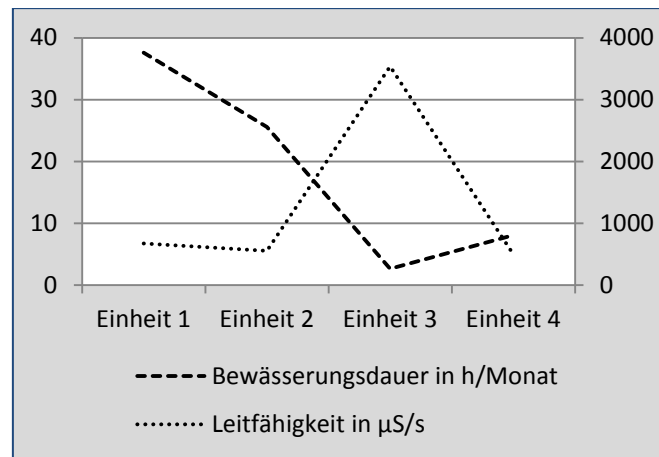


Diagramm 143: Bewässerungsdauer und Salinität des Bewässerungswassers in den Einheiten

Nach Einschätzung vieler Bewohner der Oase, ist das Wasser aus den tiefen Regierungsbrunnen, wie sie hauptsächlich in Quasaa und Mamour genutzt werden, „schlechtes Wasser“. Tatsächlich sind aber Salinität und SAR-Wert desto weniger ausgeprägt, je tiefer der Brunnen ist. Die Aussage der Bauern bezieht sich demnach vermutlich auf die Qualität als Trinkwasser, da das Wasser aus den Tiefbrunnen geschmacklos ist (vgl. BLISS 2006). Die Salinität des Bewässerungswassers ist lediglich auf den Standorten der Clustereinheit 3 deutlich erhöht. Die anderen Einheiten unterscheiden sich mit Mittelwerten um 500 µS/s kaum voneinander. Einige Flächen der dritten Clustereinheit werden gar nicht bewässert, weshalb der Mittelwert für die Bewässerungsdauer hier gegen Null geht. Die Extremstandorte der Oase werden demnach tendenziell wenig bis gar nicht bewässert, oder es wird stark salzhaltiges Bewässerungswasser verwendet. Die Standorte der Einheit 1, also hauptsächlich jene der Oasenteile Quasaa und Mamour, werden deutlich länger bewässert als andere Standorte (siehe auch Abb. 28, Kap. 5.2.4). Nach RICHTER & SCHMIEDECKEN (1985) sind diese hohen Bewässerungsmengen für junge Palmenhaine notwendig, um der Neigung zur Austrocknung bedingt durch die hohen Verdunstungsraten entgegenzuwirken.

Nach KOVDA et al. (1967) wird das Bewässerungswasser nach 6 Kriterien bewertet: 1) Salinität, 2) Natrium, 3) Alkalität, 4) Chlorid, 5) Bor und 6) Magnesium. Es werden daher für viele Klassifizierungen die Salinität und der SAR-Wert (siehe Kap. 5.2.5) in Beziehung gesetzt. Die Richtwerte der US Salinity Laboratory geben 4 Güteklassen der Schädigung durch Natrium vor (S1-S4), in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit des Bewässerungswassers

(ACHTNICH 1980, verändert nach RICHARDS 1954). Nach dieser Klassifizierung sind die Brunnen der Oase Quasaa den Klassen S1, S2 und S3 zuzuordnen (*geringe bis starke Schädigung durch Natrium*), die Brunnen Mamours der Güteklasse S1, und die Brunnen Zabus und Bawitis den Klassen S1 und S2. Das Wasser des Drainagegrabens in Bawiti ist wie zu erwarten der Klasse S4 zuzuordnen. Güteklasse S2 bedeutet allerdings nicht, dass dieses Wasser ohne Einschränkung verwendet werden kann. Nach Definition der US Salinity Laboratory kann dieses Wasser „*auf lehmig-tonigen Böden mit hoher Kationenaustauschkapazität, besonders bei unzureichender Auswaschung und geringem Gehalt an Gips im Boden (...) Schädigungen des Pflanzenbestandes (...)*“ verursachen (ACHTNICH 1980 nach RICHARDS 1954). Nach einer Klassifizierung aus Algerien wäre das Brunnenwasser in Bahariya jedoch selbst für Lehmböden geeignet (Grenzwert 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), und auch das Drainagewasser mit $> 8.000 \mu\text{S}$ könnte noch für die Bewässerung von Ackerfrüchten, Futterpflanzen und Datteln verwendet werden (KOVDA et al. 1967 nach DURAND 1958). Die solcherart bewässerten Standorte Bawitis können also bei ausreichenden Wassergaben und Bodenauswaschung durchaus ertragreich sein.

6.4 Die Bodenqualität anhand ausgewählter Bodenparameter

6.4.1 Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte

Die Bodentextur ist eine Steuerungsgröße der Wasserdurchlässigkeit und damit der potenziellen Salzauswaschung (vgl. SAMIMI 1991). Ein Vergleich von bewässerten Böden unterschiedlicher Textur bei KOVDA et al. (1967) zeigt einen deutlichen Anstieg des Chloridgehalts, je feinkörniger die Bodentextur ist (Cl liegt in Verbindung mit Na als Salz vor (BLUME et al. 2010)). Allerdings können durch eine gröbere Textur auch vermehrt Nährstoffe ausgewaschen werden, die für den Pflanzenwuchs von Bedeutung sind. Die Wasserleitfähigkeit ist auch von der Lagerungsdichte abhängig (RENGER et al. 2009). Aus der Kombination der beiden Parameter kann die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert in cm/Tag) geschätzt werden. Analog zum Sandanteil ergab sich eine Reihung der Oasenteile nach kf-Werten von Mamour (122 cm/Tag) $>$ Quasaa (88 cm/Tag) $>$ Bawiti (58 cm/Tag) $>$ Zabu (24 cm/Tag). Die Möglichkeit der Salzauswaschung ist demnach in den jüngeren Oasengebieten eher gegeben, als in den alten Oasen Bawiti und Zabu. Nach HAZELTON &

MURPHY (2007) kann eine niedrige Leitfähigkeit wie im Fall von Zabú zu Problemen bei der Bewässerung führen wenn die Verdunstungsrate hoch ist, da sich die Poren nur langsam wiederauffüllen. Erosion wäre ein weiteres mögliches Problem bei niedriger Wasserleitfähigkeit. Allerdings ist bei flachen Hängen < 2 % und behutsamer Bewässerung, wie sie in traditionellem Flächenüberstau stattfindet, nicht mit Erosion zu rechnen (vgl. HAZELTON & MURPHY 2007; KOVDA et al. 1967). Zudem sind der Skelettanteil sowie die Wurzeldichte in tieferen Lagen der Böden Zabús und Bawitis erhöht. Die Sekundärporen durch Wurzeltätigkeit verbessern die Wasserleitfähigkeit insgesamt (vgl. SAMIMI 1991).

6.4.2 Elektrische Leitfähigkeit

Die Schädigung durch Salze im Boden wird von verschiedenen Effekten hervorgerufen. Eine mögliche Schädigung ist die Störung der Ionenbalance, wodurch die Nährstoffverfügbarkeit sinkt (IUSS Working Group WRB 2007). Zudem verstärken Salze den Trockenstress einer Pflanze durch Erhöhung des osmotischen Potenzials. Dieses müssen die Pflanzen zusätzlich zum Matrixpotenzial überwinden, um Wasser aufnehmen zu können. Um das osmotische Potenzial zu berechnen, wird die EC_e mit dem Faktor 650 multipliziert. Salztolerante Pflanzen, wie beispielsweise die Baumwolle, die an aride Bedingungen angepasst sind, können ein Gesamtpotenzial (Bodenwasserpotenzial) von 25.000 hPa überleben. (IUSS Working Group WRB 2007). Zum Vergleich: dieser Wert wird bei den Extremstandorten der Oase bereits durch das osmotische Potenzial alleine überschritten (Standort 2/4: 72.267 hPa). Allerdings wird bereits ab einem Wert von 20.188 hPa normaler Ackerbau betrieben, wie auf einem Standort in Mamour (2/8: Anbau von Alfalfa). Das Sättigungsextrakt dieses Standorts hat einen elektrischen Leitwert von 31.000 $\mu S/cm$ und überschreitet damit die für Futterpflanzen bei sandigen Böden postulierten Maximalwerte um beinahe das Dreifache (ACHTNICH 1980). Wie in Kapitel 3.4.4 geschildert, wurzelt diese Luzernenart sehr tief, und kann so möglicherweise auf günstigere Bedingungen in tieferen Lagen zugreifen.

Im Allgemeinen steigt der EC-Wert mit höherem Tongehalt des Bodens an, besonders in Tonen mit hoher KAK (USDA 2011a). Demzufolge liegen die Grenzwerte der Salzverträglichkeit der Pflanzen für Sandböden generell höher als für andere Bodenarten. Im sandreichen Gebiet Quasaa liegen zudem die EC-Werte im Schnitt unter jenen der anderen Teilgebiete. Es herrschen hier also in Bezug auf die Bodensalinität sehr günstige Wachstumsbedingungen für Kulturpflanzen. Die z. T. sehr hohen Leitwerte in Mamour

können auf die extremen Standortbedingungen mancher Flächen zurückgeführt werden. Auf Brachland und ehemals bewässertem Kulturland kommt es hier zu starker Salzakkumulationen an der Bodenoberfläche. Dieser Effekt kann auch auf den brachgefallenen Flächen in Bawiti und Zabü beobachtet werden. In Quasaa zeigen die nicht bewässerten Standorte ebenfalls hohe EC-Werte, allerdings erreichen sie nur etwa 25 % derjenigen auf den Brachen Mamours. Eine mögliche Ursache für diese Differenzen ist der unterschiedliche Grundwasserstand (vgl. VAN SCHILFGAARDE 1984). Die beiden Extremstandorte 2/2 und 2/4 zeigen hohen Grundwasserstände mit 50 cm Tiefe (am Mamour-See vermutlich noch höher). Hier wird in den umliegenden Oasengärten exzessiv bewässert, was den Grundwasserstand auf tiefer gelegenen Flächen erhöht (VAN SCHILFGAARDE 1984). Auch in Bawiti steigt das Grundwasser an tiefer gelegenen Standorten sehr hoch auf 45 cm unter GOK. In Quasaa hingegen befindet sich erst in einer Tiefe von über 80 cm ein stauender, hydromorpher Horizont.

Nach Einschätzung desjenigen Bauers, der die stark versalzten Böden am Nordrand Bawitis bewirtschaftet (5/9 und 5/10), kann die Versalzung mithilfe von Düngern vermindert werden. Der organische Dünger wird im Juni (etwa 60 kg/Palme), der chemische Dünger im November aufgetragen. Mineralische Böden mit hohen Anteilen organischer Substanz zeigen jedoch i. a. höhere EC-Werte, ebenso Böden unter Einfluss von chemischen Düngern, die selbst häufig Salze enthalten (USDA 2011a).

Die Bodenqualität in Bezug auf Salinität kann im Teilgebiet **Quasaa** als moderat bezeichnet werden. Der Medianwert entspricht einem EC_e von ~ 3 dS/m und ist damit für moderat tolerante Kulturen geeignet (vgl. HAZELTON & MURPHY 2007). Die *medicago sativa* oder Alfalfa wächst in Quasaa jedoch auch bei EC-Werten über den postulierten Grenzwerten für Luzernen (2.8 dS) ausgesprochen gut, wie auf Fläche 1/5 mit 2.9 dS EC_e (HAZELTON & MURPHY 2007 nach AYERS 1977). In **Mamour** hingegen ist der Median von ~ 19 dS zu hoch für alle Kulturpflanzen. In Palmenhainen mit > 100 % durchschnittlicher Gesamtdeckung sind die EC-Werte jedoch sehr günstig mit durchschnittlich 2.4 dS, dagegen steigen die Leitwerte auf offenen Flächen rapide an. Gerste wächst in Mamour noch sehr gut (Abb. 46) bei einer Leitfähigkeit des Sättigungsextraktes von 16 dS, was die von AYERS empfohlenen Grenzwerte um das Doppelte überschreitet (HAZELTON & MURPHY 2007 nach AYERS 1977). In **Zabü** kommt der hohe Tonanteil in den Böden zum Tragen. Der Median des Leitwerts

beträgt ~ 7 dS. Nur tolerante Kulturpflanzen können hier noch ihre volle Produktion erreichen. In Zabu wird nur wenig Ackerbau betrieben, die meisten höher gelegenen Standorte besserer Qualität werden mit Dattelpalmen oder Obstplantagen besiedelt. Auf einer Fläche mit 5.8 dS/m wird Mais angebaut (der Grenzwert nach FAO-Richtlinien liegt bei 1.7 dS (vgl. HAZELTON & MURPHY 2007 nach AYERS 1977), allerdings ist über die Produktivität dieser Anbaufläche nichts bekannt. Werden nur jene Standorte betrachtet, deren durchschnittliche Gesamtdeckung bei 100 % und mehr liegt, ergibt sich ein Mittelwert von 3.8 dS/m, was für tolerante Kulturpflanzen wie die Dattelpalme günstige Bedingungen darstellt (Grenzwerte nach FAO-Richtlinien bei 4 dS/m (HAZELTON & MURPHY 2007)). In **Bawiti** liegt der Median bei nur 2.7 dS/m und ist damit für Dattelpalmen nicht ertragsmindernd. Sonstige Kulturen wie Alfalfa oder Gerste werden zum Großteil auf sandreicheren, weniger salinen Böden angebaut.



Abbildung 46: Gerstenfeld in Mamour (EC_e von 16 dS/m)

Foto: Mayer (2010)

6.4.3 pH-Wert

Der pH-Wert des Bodens hat Einfluss die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Toxizität von Schadstoffen. Nach BLUME et al. (2010) enthalten schwach alkalische Böden mit pH-Werten zwischen 7.0 und 8.2 Ca-Carbonate, aber keine Na-Carbonate. In ariden Gebieten kommen dagegen häufig stark alkalische Böden in Verbindung mit hohen Salzgehalten vor. Dabei werden Natriumcarbonate angereichert und die Na-Belegung der Austauscher erhöht. Der pH-Wert verringert sich mit der Menge an beteiligten Neutralsalzen (BLUME et al. 2010). Die biologische Aktivität kann bei stark alkalischen Böden eingeschränkt sein, und

Abbauprozesse der organischen Substanz werden verlangsamt (USDA 2011b). Ein weiterer Effekt ist der Anstieg von Bor in einem ungefähren pH-Bereich zwischen 8 und 9.5. KEREN (1984) hat zeigt, dass Bor bei ansteigendem pH-Wert eher von Tonmineralen adsorbiert wird. Das Maximum der Bor-Adsorption wurde in verschiedenen Studien bei einem pH-Wert von 9 festgestellt (KEREN 1984). Nach Auskunft von EL SAIED stellt Bor in der gesamten Oase ein gewisses Problem für die Bauern dar (EL SAIED, mündliche Mitteilung, 03.2010). Eine relativ geringe Menge ist jedoch für das Pflanzenwachstum unerlässlich (HAZELTON & MURPHY 2007). In der gesamten Oase liegen die pH-Werte im alkalischen Bereich mit Ausnahme zweier Standorte mit einem pH_{pot} von 6.9. Auf 9 Standorten liegen die Werte im stark alkalischen Bereich mit $pH_{pot} > 8.2$. Diese sind die extrem salzbeeinflussten Böden der Einheit 3 aus der Clusteranalyse sowie drei weitere salzreiche Flächen in Mamour und Quasaa. Der pH-Wert erreicht scheinbar nur auf für die landwirtschaftliche Produktion ohnehin ungeeigneten Standorten der Oase eine pflanzenschädigende Wirkung. Unter Einbeziehung der Profilanalysen muss diese Aussage jedoch etwas abgeschwächt werden. Hohe pH-Werte wie in Solonchaken in Zabü (Profil 3) können somit auch unter Kulturland auftreten und das Schädigungspotenzial von Natrium im Wurzelbereich erhöhen.

6.4.4 Ionenverhältnis und KAK

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Austauschkapazität sind nach BLUME et al. (2010) der Tonanteil, der pH-Wert und der Gehalt an humifizierter organischer Substanz. Der Humusgehalt der Böden spielt in der Oase eine untergeordnete Rolle, da unter ariden Bedingungen der Anteil sowie der Abbau der organischen Substanz gering sind (RICHTER & SCHMIEDECKEN 1985). Der Einfluss des Tongehalts spiegelt sich in den Medianen der Austauschkapazität in den Oasen wider. In den alten Oasen mit höheren Tongehalten ist die Austauschkapazität der Böden günstiger. Die KAK ist u.a. ein wichtiger Puffer für Änderungen im pH-Wert, der Verfügbarkeit von Nährstoffen und wirkt stabilisierend auf die Bodenstruktur (HAZELTON & MURPHY 2007). Mit Werten unter 6 cmol/kg bis zu Werten > 40 cmol/kg rangiert die Austauschkapazität in den Oasenböden von sehr niedrig zu sehr hoch (HAZELTON & MURPHY 2007, nach MATSON 1961). Welche Kationen an der KAK beteiligt sind und in welchem Verhältnis sie zueinander stehen, ist von besonderem Interesse.

Kalium erhöht den osmotischen Druck und begünstigt den Quellungszustand der Pflanzenzellen (SAMIMI 1991). Zudem steigert eine gute Kaliumversorgung die Resistenz der Böden gegenüber Dürre (BLUME et al 2010). Niedrige Kaliumgehalte findet man in jüngeren Böden mit geringen Tongehalten, sowie in stark verwitterten Böden der Tropen, wo es zu Kaolinitbildung kommen kann (BLUME et al 2010). Ein optimaler Kaliumgehalt liegt zwischen 1.28 und 2.56 mmol/l in der Bodenlösung (SAMIMI 1991 nach SCHLEIFF 1975). Mit 1.72 mmol/kg in Zabü und 1.41 mmol/kg in Bawiti ist die Kaliumversorgung hier ausreichend, in den Teilgebieten Quasaa (0.99 mmol/kg) und Mamour (0.86 mmol/kg) hingegen unter dem Optimum.

Die Ionen Kalzium, Magnesium und Natrium müssen für eine günstige Nährstoffversorgung der Pflanzen in bestimmten Verhältnissen vorliegen. So neigen beispielsweise Böden mit hohem Natrium- und Magnesiumanteil eher zu Dispersion als Böden mit hohem Natrium- und Kalziumanteil (HAZELTON & MURPHY 2007). Die Ca/Mg-Verhältnisse liegen alle im unteren Bereich mit Tendenz zu Kalziummangel (HAZELTON & MURPHY 2007). Das austauschbare Natrium in % (ESP) ist mit 12 % in Quasaa und 10 % in Mamour in den jüngeren Oasen stärker vertreten. Allerdings ist das Verhältnis zu Ca und Mg hier und auch in Bawiti günstiger als in Zabü. Betrachtet man die Höchstwerte des ESP, korrelieren diese stark mit den EC-Werten und sind auf den Extremstandorten der Oase zu finden. Diesen Zusammenhang gibt auch das RDA-Diagramm wieder. Unter bewässerten Böden liegen die Werte aber < 10 %, was als moderat angesehen werden kann (HAZELTON & MURPHY 2007).

7. Conclusio und Ausblick

Zum Abschluss sind einige einschränkende Anmerkungen zu den Ergebnissen dieser Arbeit notwendig:

Die schwierigen Bedingungen bei den Geländeerhebungen führten leider in weiterer Folge zur Unterpräsenz der Umweltvariablen in der Auswertung. Die statistische Aussagekraft bei der Betrachtung von nur zwei Parametern (Deckung und Höhe) in der Ordinationsanalyse muss daher mit Vorsicht betrachtet werden. Zudem konnte der Einfluss der Deckungsgrade der verschiedenen Vegetationsschichten nicht ermessen werden. Der großflächige Anbau beispielsweise von Futterpflanzen auf Neuland ging als Krautschicht in die Analysen ein, was möglicherweise zu Verzerrungen bei der Ordination führte. Die Vegetationserhebungen wurden daher so gut als möglich unabhängig von der RDA-Analyse betrachtet, ebenso wurde mit den Daten zu Bewässerung und Wasserqualität verfahren.

Die Auswertung bodenkundlicher Daten mit der Ordinationsanalyse bietet grundsätzlich viele interessante Aspekte, für die der Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht ausreichend war. Auf die Darstellung der Böden in kleineren Clustergruppen oder mittels direkter Ordinationsverfahren wurde daher verzichtet. Allerdings kann die Wahl der Methodik für den vorgegebenen Maßstabsbereich als ausreichend betrachtet werden. Für die Analyse kleinräumiger Unterschiede müssten möglicherweise andere Darstellungen gewählt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. Es konnten drei verschiedenen Gruppen von Standorten ausgemacht werden: (1) die Standorte der „alten Oase“, (2) die Standorte der „jungen Oase“ und (3) die Extremstandorte.
2. Diese drei Gruppen werden von unterschiedlichen Parametern der Bodenqualität gekennzeichnet. Die Böden der alten Oasen zeigen höhere Nährstoffgehalte, sowie höhere Ton- und Schluffgehalte, während die jungen Oasenböden sandreich und nährstoffarm sind. An ungünstigen Standorten neigen die alten Oasenböden jedoch zu Verdichtung und ungünstigen Sorptionsverhältnissen. Diesen Effekten wirken in den jungen Oasen der hohe Sandanteil und die besseren Drainagebedingungen

entgegen. Bei Flächenaufgabe kommt es jedoch in beiden Gruppen zur Entwicklung von ausgeprägten Hypersalic Solonchaken.

3. Insgesamt finden sich die fruchtbareren Bodentypen in den alten Ökosystemen, hier v.a. in höheren Lagen. Der Umweltparameter Höhe ü. NN spielt also eine wichtige Rolle bei der räumlichen Ausprägung der Bodenqualität. Auch konnte ein positiver Effekt von dichter Vegetationsbedeckung auf die Bodenqualität festgestellt werden.
4. Die Produktivität der Böden hinsichtlich landwirtschaftlicher Nutzung kann allerdings sowohl in jungen als auch älteren Oasenteilen sehr gut sein. Es kommen also andere wichtige Umweltparameter zum Tragen, und es liegt die Vermutung nahe, dass die Bewässerungs- und Drainagebedingungen hier eine entscheidende Rolle spielen.

Die Böden Bawitis erwiesen sich in den meisten durchgeführten Analysen als die heterogenste Gruppe. Für weitere Untersuchungen könnte sich dieser Oasenteil daher als Schlüsselgebiet herausstellen. Von besonderem Interesse wäre die Untersuchung der in den Randgebieten stattfindenden Bewässerung mit extrem salzhaltigem Drainagewasser, sowie der voranschreitenden Versalzung auf potenziell ertragreichen Böden im Oaseninneren.

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben gezeigt, dass in demselben Oasenökosystem unterschiedlichste Standortbedingungen vorherrschen können. Diese Heterogenität des Bewässerungsbaus in Bahariya ist zu einem Großteil auf die Entwicklungen der letzten vier bis sechs Jahrzehnte zurückzuführen, in denen die Oase einen Wandlungsprozess durchgemacht hat. Dieser kann exemplarisch am Vergleich zwischen älteren und jüngeren Oasengärten dargestellt werden. Die Entwicklung der Oase zu großflächigem Neulandgewinn, einer Änderung in Bewässerungs- und Drainagetechnik, sowie in einer Änderung der Kulturpflanzen, ist jedoch ein fortschreitender Prozess. Um die damit einhergehenden Gefahren, wie der Versalzung, der Ausbeutung der Grundwasserreserven oder auch das Verlorengelassen von Wissen über nachhaltige Kultivierung verhindern zu können, sind Beobachtungen über einen längeren Zeitraum notwendig. Großräumige Untersuchungen von Versalzung oder Vegetationsverlusten in Kombination mit Methoden der Fernerkundung könnten zukünftige politische Entscheidungen zu einem besseren Ergebnis führen, und das Projekt „Neues Tal“ könnte im Sinne der Bevölkerung Bahariyas gelingen.

Literaturverzeichnis

ACHTNICH, W. (1980): Bewässerungslandbau : agrotechnische Grundlagen der
Bewässerungswirtschaft. - Stuttgart.

BACKHAUS, K. (1990): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte
Einführung. – Berlin [u.a.], 6. Aufl.

BAHRENBURG, G., GIESE, E. und NIPPER, J. (2008): Statistische Methoden in der Geographie.
Multivariate Statistik. Band 2. – Stuttgart.

BERNHARDT, H. und BRETSCHNEIDER, H. [Hrsg.] (1982). Taschenbuch der Wasserwirtschaft.
- Hamburg [u.a.].

BILLEN, N. und STAHR, K. (2009): Bodenkundlich relevante Aspekte in der BioSt-NachV.
Diskussionspapier / Erläuterungen. – Stuttgart.

http://www.oeko.de/service/bio/dateien/bodengut_2009_boden.pdf

(letzter Zugriff am 25.10.2012)

BLISS, F. (2006): Oasenleben. Die ägyptischen Oasen Bahariya und Farafra in Vergangenheit
und Gegenwart. Die Ägyptischen Oasen Band 2. – Bonn.

BLUME, H.-P. et al. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – Heidelberg, 16. Aufl.

<http://www.springerlink.com/content/n75v13/#section=643721&page=1>

(letzter Zugriff am 25.10.2012)

DEUTSCHER WETTERDIENST (2007). - Offenbach.

Klimarechner des DWD auf <http://www.dwd.de/> (letzter Zugriff am 25.10.2012)

Google Inc. (2011): Google Earth. Bildaufnahmedatum 10.04.2003

HANDL, A. (2010): Multivariate Analysemethoden. Theorie und Praxis multivariater
Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS. – Berlin [u.a.].

<http://www.springerlink.com/content/lgw505/#section=761608&page=1>

(letzter Zugriff am 25.10.2012)

HAZELTON, P. und MURPHY, B. M. (2007): Interpreting Soil Test Results. What do all the numbers mean?. - Sydney.

<http://www.bellingerlandcare.org.au/documents/InterSoilTestResults.pdf>

(letzter Zugriff am 25.10.2012)

IBRAHIM, F. N. (2006): Ägypten: Geographie, Geschichte, Wirtschaft, Politik. – Darmstadt.

IUSS Working Group WRB (2007): World Reference Base for Soil Resources 2006. Erstes Update 2007. Deutsche Ausgabe. – Übersetzt von Peter Schad. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.], Hannover.

JUNGFER, E. (2001): Wasserpotenziale in Nordafrika. – In: Geographische Rundschau, 53, S. 56 - 62.

KARLEN, D. L. et al. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). – In: Soil Science Society of America: Journal, 61, S. 4 - 10.

Klimadiagramme (o. J.): www.klimadiagramme.de (letzter Zugriff am 28.09.2012)

KOVDA et al. (1967): International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. draft edition. – FAO/Unesco [Hrsg.], Rom.

<http://unesdoc.unesco.org> (letzter Zugriff am 25.10.2012)

LAUER, W. und BENDIX, J. (2004): Klimatologie. – Braunschweig, 2. Aufl.

LEYER, I. (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. Eine Einführung. - Berlin [u.a.].

LOVEDAY, J. (1984): Amendments for Reclaiming Sodic Soils. – In: Shainberg, I. [Hrsg.], Soil Salinity under Irrigation. Processes and Management. – Berlin [u.a.]. - Ecological Studies, 51, S. 220 - 237.

MAUSBACH, M. J. und SEYBOLD, C. A. (1997): Assessment of Soil Quality. – In: Lal, R. [Ed.]: Soil Quality And Agricultural Sustainability. S. 33 - 43.

MÜLLER-MAHN, D. (2001): Ägyptens ländlicher Raum im Umbruch. – In: Geographische Rundschau, 53:6, S. 4 - 10.

ÖNORM - Österreichisches Normungsinstitut (1993): L 1092. Chemische Bodenuntersuchungen. Bestimmung waasserlöslicher Stoffe. - Wien.

- ÖNORM - Österreichisches Normungsinstitut (1999): L 1080. Chemische Bodenuntersuchungen. Bestimmung des organischen Kohlenstoffs durch trockene Verbrennung. – Wien
- ÖNORM - Österreichisches Normungsinstitut (2001): L 1086-1. Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der austauschbaren Kationen und der effektiven Kationen-Austauschkapazität (KAK_{eff}) durch Extraktion mit Bariumchlorid-Lösung. - Wien.
- ÖNORM - Österreichisches Normungsinstitut (2002): L 1061-2. Physikalische Bodenuntersuchungen. Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens. Teil 2 - Feinboden. - Wien
- ÖNORM - Österreichisches Normungsinstitut (2006): L 1083. Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Acidität (pH-Wert). - Wien.
- PFEIFER, H. (1999): Angewandte Pflanzengeographie in maghrebinischen Oasen : unter besonderer Berücksichtigung der Ackerwildkräuter als agrarökologische Phytoindikatoren. – In: Dissertationes botanicae, 319. – Berlin.
- RENGER, M. et al. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. – In: Bodenökologie und Bodengenese, 40, S. 5 – 51.
- www.boden.tu-berlin.de/fileadmin/fg77/_pdf/publikationen/bodenphysikalischeKennwerte.pdf (letzter Zugriff am 25.10.2012)
- RICHTER, M. und SCHMIEDECKEN, W. (1985): Das Oasenklima und sein ökologischer Stellenwert. – In: Erdkunde, 39, S. 179 - 197.
- SAARONI, H. et al. (2004): The mixed results concerning the 'oasis effect' in a rural settlement in the Negev Desert, Israel. – In: Journal of Arid Environments, 58, S. 235 - 248.
- SAMIMI, C. (1991): Die Oasenböden Figuigs unter dem Einfluß salzhaltigen Bewässerungswassers. – In: Popp H. [Hrsg.], Geographische Forschungen in der Saharischen Oase Figuig. – Passau, S. 161 – 174.

- SCHIFFERS, H. (1970): Stichwort "Oasen". – In: Westermann Lexikon der Geographie, 3. – Braunschweig, S. 618 - 624.
- SCHLÜTER, T. (2006): Geological Atlas of Africa. - Berlin-Heidelberg.
- SELLAMI, M. H. und SIFAOU, M. S. (1998): Measurements of microclimatic factors inside the oasis : interception and sharing of solar radiation. – In: Renewable Energy , 13:1, S. 67 - 76.
- SPONAGEL, H. [Red.] (2005): Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung. – Hannover, 5. Aufl.
- THORWEIHE, U. (1990): Nubian Aquifer system. In: Said, R. [Hrsg.], The Geology of Egypt. - Rotterdam, S. 734
- THORWEIHE, U. und HEINL, M. (1999): Grundwasserressourcen im Nubischen Aquifersystem. – In: Klitzsch, E. und Thorweihe, U. [Hrsg.], *Nordost-Afrika: Strukturen und Ressourcen.* - Weinheim [u.a.], S. 676.
- TRAXLER, A. (2007): Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings. Methoden, Praxis, angewandte Projekte. Teil A: Methoden. – Wien, Umweltbundesamt, 89.
- <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M089A.pdf>
(letzterZugriff am 25.10.2012)
- USDA – United States Department of Agriculture (1999): Soil Quality Test Kit Guide.
<http://soils.usda.gov/sqi/assessment/assessment.html> (letzter Zugriff am 25.10.2012)
- USDA – United States Department of Agriculture (2011a): Soil Quality Indicators. Soil Electrical Conductivity.
http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/EC_sq_chemical_indicator_sheet.pdf
(letzter Zugriff am 25.10.2012)
- USDA – United States Department of Agriculture (2011b): Soil Quality Indicators. Soil pH.
http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/pH_sq_chemical_indicator_sheet.pdf
(letzter Zugriff am 25.10.2012)

UTZ, H. D. (2005): Oasen Nordafrikas. Naturräumliche Gegebenheiten, ökonomische Entwicklungen und demographische Wandlungsprozesse, dargestellt an Beispielen, mit besonderer Berücksichtigung ägyptischer, tunesischer und algerischer Oasen. – Universität Wien: Dissertation.

VAN SCHILFGAARDE, J. (1984): Drainage Design for Salinity Control. – In: Shainberg, I. [Hrsg.], Soil Salinity under Irrigation. Processes and Management. – Berlin [u.a.]. - Ecological Studies, 51, S. 190 - 197.

ZECH, W. und HINTERMAIER-ERHARD, G. (2002): Böden der Welt. Ein Bildatlas. - Heidelberg, Berlin.

Anhang

Anhang 1

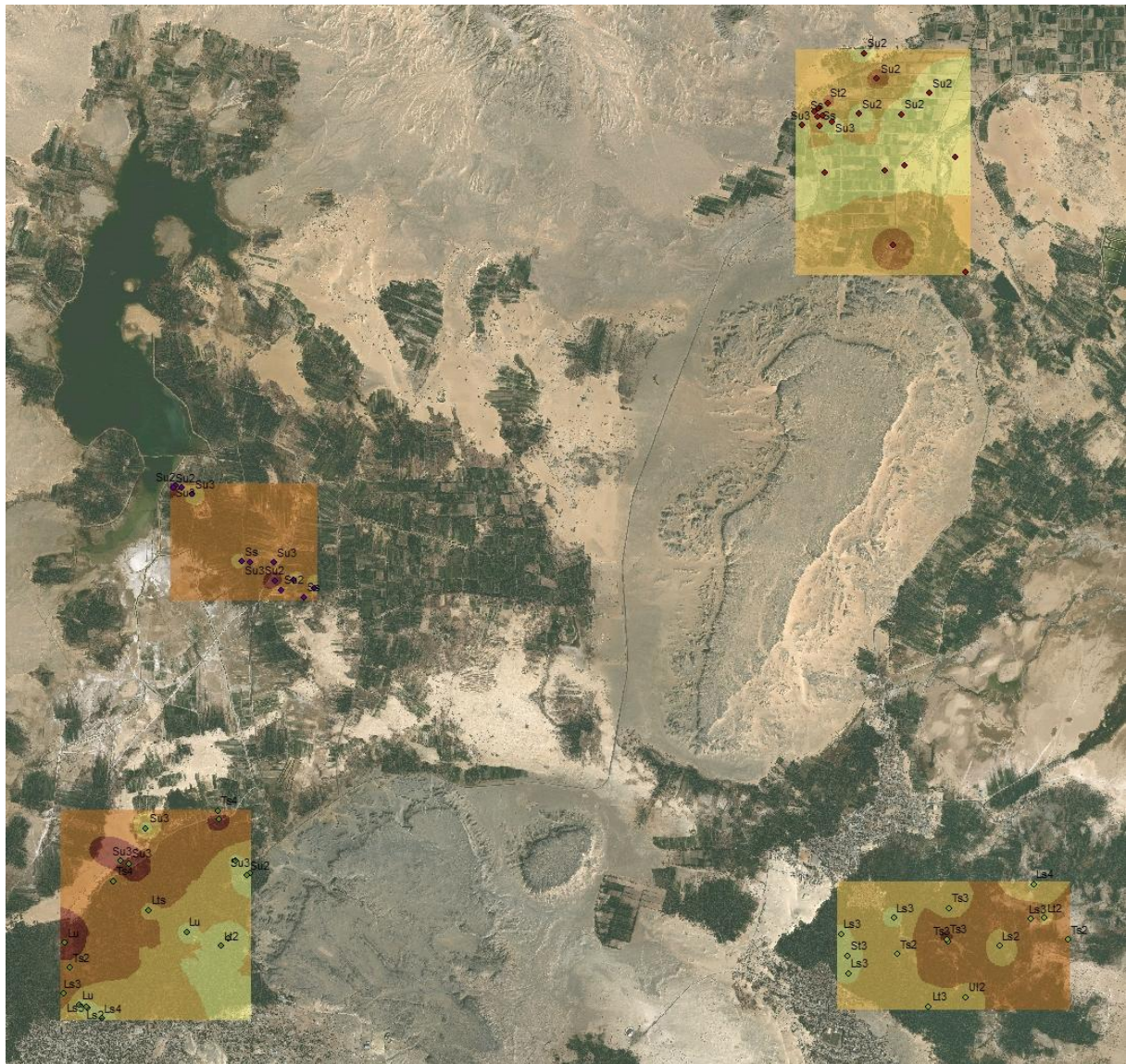


Abbildung 47: Entwurf einer Bodenversalzungskarte auf Basis der Geländemessungen 2010. Klassifikation der Leitfähigkeitswerte nach ACHTNICH (1980), Angabe der Bodenart nach der Fingerprobe im Gelände. Erstellt in ArcMap.

Anhang 2

Probennahmeprotokoll

Allgemeine Angaben

Probenname:
Probennummer:
Datum / Uhrzeit:
Koordinaten y:
x:
gestört / ungestört
Entnahmetiefe (in cm):

Angaben zum Standort

Entfernung zum Entwässerungsgraben (in m):
Geländeneigung / -unebenheiten: ja / nein
wenn ja, weitere Angaben (Mulde, Kuppe, etc.):
sichtbare Versalzung an der Bodenoberfläche: ja / nein
Vegetationsbedeckung: offen / geschlossen
wenn Bedeckung, weitere Angaben (wie bei Vegetationsaufnahme):
oder Verweis auf Vegetations-Aufnahmeblatt:
(Mangelercheinungen evtl. wichtig)
Bewässerungstechnik:
Bewässerungswasser:
Leitfähigkeitswert:
oder Verweis auf Wasseruntersuchung:
Sonstiges / Besonderheiten (alles, was euch noch wichtig erscheint):

Befragung

Düngung: ja / nein
wenn ja, wie viel:
Bewässerungstechnik (wenn nicht ersichtlich):
Bewässerungshäufigkeit:
Unterirdische Drainagerohre: ja / nein
Sonstiges:

Boden - Allgemein

Wo die Proben genau genommen werden, wird erst im Gelände festgelegt (Auswahl Einflussfaktoren: Vegetationsart und -dichte, Bewässerungstechnik und -häufigkeit, Düngung, Geländeunebenheiten, Bodendurchlässigkeit, etc.). Bei deutlich versalzten Gebieten Probennahme evtl. entlang einer Profillinie.

Anhand der Untersuchungen im Gelände werden dann die Proben genommen. Eine ungestörte Stechzylinderprobe für ein exaktes Volumen, und eine Mischprobe, beide aus den oberen 10cm. In separate Plastiktüten doppelt verpacken. Insgesamt 200-300g

Anhang 3

```
#####  
## SKRIPT DIPLOMARBEIT FLEISCHANDERL # letzte Bearbeitung 16.10.2012 #  
#####  
  
#####  
## Clusteranalyse ##  
#####  
  
# Daten einlesen  
boden0<-read.table(file = "boden0.txt",header=TRUE,sep="\t", row.names=1)  
attach(boden0)  
  
source("f.phi.table.R")  
source("f.clust.grp.R")  
  
# Daten transformieren und standardisieren  
boden0cl <- scale(boden0, center=T, scale=T)  
boden0cl <- as.data.frame(boden0cl)  
  
# Distanzmatrix berechnen (Euklidische Distanz)  
boden0dis <- dist(boden0cl, method="euclidean")  
#####  
  
# Klassifikation (ward)  
boden0ward <- hclust(boden0dis, method="ward")  
# 10Gruppen bilden #  
gr.ward <- cutree(boden0ward, k=10)  
# Dendrogramm #  
old.par <- par(no.readonly=T)  
plot(boden0ward, cex=0.6, cex.lab=1.8, hang=-1, main="", sub="", xlab="", ylab="Ähnlichkeit")  
  
# Klassifikation (average) #  
boden0aver <- hclust(boden0dis, method="average")  
# 10Gruppen bilden #  
gr.aver <- cutree(boden0aver, k=10)  
# Dendrogramm #  
old.par <- par(no.readonly=T)  
plot(boden0aver, cex=0.6, cex.lab=1.8, hang=-1, main="", sub="", xlab="", ylab="Ähnlichkeit")  
#####  
  
# Vergleiche der Modelle mit Distanzmatrix  
boden0ward.coph<-cophenetic(boden0ward)  
cor.test(boden0dis,boden0ward.coph)  
boden0aver.coph<-cophenetic(boden0aver)  
cor.test(boden0dis,boden0aver.coph)  
#####  
  
# Festlegung des cut-levels  
# vier Gruppen Ward  
clust.grp(boden0ward)  
boden0ward.grp4<-cutree(boden0ward,k=5)  
plot(boden0ward,main="Tabelle (Euclidean Distance, Ward's Method)",sub="",ylab="Euclidean-Dist.",xlab="Aufnahme-Nr.",hang=-1)  
rect.hclust(boden0ward,k=5)  
boden0ward.grp4  
  
# vier Gruppen Average  
clust.grp(boden0aver)  
boden0aver.grp4<-cutree(boden0aver,k=4)  
plot(boden0aver,main="Tabelle (Euclidean Distance, Average-Linkage Method)",sub="",ylab="Euclidean-Dist.",xlab="Aufnahme-Nr.",hang=-1)  
rect.hclust(boden0aver,k=4)  
boden0aver.grp4  
  
#acht Gruppen Ward  
clust.grp(boden0ward)  
boden0ward.grp8<-cutree(boden0ward,k=8)  
plot(boden0ward,main="Tabelle (Euclidean Distance, Ward's Method)",sub="",ylab="Euclidean-Dist.",xlab="Aufnahme-Nr.",hang=-1)  
rect.hclust(boden0ward,k=8)
```

```

boden0ward.grp8

#8 Gruppen Average
clust.grp(boden0aver)
boden0aver.grp8<-cutree(boden0aver,k=8)
plot(boden0aver,main="Tabelle (Euclidean Distance, Average-Linkage Method)",sub="",ylab="Euclidean-Dist.",xlab="Aufnahme-
Nr.",hang=-1)
rect.hclust(boden0aver,k=8)
boden0aver.grp8

#####
## Ordination ##
#####

# Daten einlesen
umwelt0<-read.table (file = "umwelt0.txt",header=TRUE,sep="\t", row.names=1)
attach(umwelt0)
gruppen<-read.table (file = "gruppen.txt",header=TRUE,sep="\t", row.names=1)

source("f.plot.ord.R")
source("f.ord.select.R")
#####

# Daten vorbereiten #
boden0.t <- scale(boden0, center=T, scale=T)
boden0.t <- as.data.frame(boden0.t)
class(boden0.t)

umwelt0.t <- scale(umwelt0, center=T, scale=T)
umwelt0.t <- as.data.frame(umwelt0.t)
class(umwelt0.t)

#####
## PCA ##
#####

boden0.c<-cor(boden0.t,method="spearman")
boden0.c
boden0.pca<-princomp((boden0.c), cor=T)
loadings(boden0.pca)
summary(boden0.pca)
screeplot(boden0.pca)

par(mfrow = c(1, 2))
biplot(boden0.pca, scale=1, cex=c(0.4, 1), main="Correlation biplot")
abline(h=0, lty=2)
abline(v=0, lty=2)

biplot(boden0.pca, scale=0, cex=c(0.4, 1), main="Distance biplot")
abline(h=0, lty=2)
abline(v=0, lty=2)

#####
## CA ##
#####

library (ca)

boden0.ca<-ca(boden0)
boden0.ca

rowprc0<-boden0.ca$rowcoord %*% diag(boden0.ca$sv)
(boden0.ca$rownames->rownames(rowprc0))
namo0<-paste("Achse", sep="", 1:ncol(rowprc0))
(namo0->colnames(rowprc0))
write.csv2(rowprc0, "ZeilPrinkoord0.csv", quote=FALSE, row.names=TRUE)

plot(boden0.ca, map="rowprincipal", mass=c(TRUE,TRUE), contrib=c("relative", "relative"), xlim=c(-2,1.5), ylim=c(-2,1.5), col=c(1,4),
labels=c(2,2))
title(xlab="erste CA-Hauptachse", ylab="zweite CA-Hauptachse", cex.lab=.9, main="Korrespondenzanalyse (CA)", sub="(symmetrischer
Biplot mit Zeilen in Prinzipalkoordinaten. Die Zeilenpunkte sind nach Gruppenzugehörigkeit eingefärbt)", cex.sub=.75,)

```

```

plot(boden0.ca, map="rowprincipal", xlim=c(-2,2), ylim=c(-2,2), what = c("none","none"))
points(rowprc0[,1:2], pch=21, bg=c(2,7,4)[boden0.ca$gruppe])
points(boden0.ca$colcoord[,1:2], pch=24, bg=3, cex=0.8)
text(boden0.ca$colcoord[,1:2], boden0.ca$colnames, adj=-.4)
text(rowprc0[,1:2], boden0.ca$rownames, adj=-.4, cex=0.5)
title(xlab="erste CA-Hauptachse", ylab="zweite CA-Hauptachse", cex.lab=.8, main="Korrespondenzanalyse (CA)", sub="Biplot mit Zeilen in
Prinzipalkoordinaten.", cex.sub=.7)

#####
## DCA ##
#####

library(vegan)
boden0.dca<-decorana(boden0)
summary(boden0.dca)
plot.ord(boden0.dca,scaling=3, grp=gruppen$Gruppe4,pc=c("black","red","green","blue"),pg=c(16,16,16,16), plabel=NULL,legend=TRUE,
pmax=0.05)
title(main=" Detrended Correspondence Analysis(DCA)", sub="(Plot mit Zeilen in Prinzipalkoordinaten)", cex.sub=.75,)
#####

# Alternativ-Plot
par(mfrow=c(1,1))
plot(boden0.dca, choices = c(1,2), type= "n", xlim=c(-1,1), ylim=c(-1,1))
plot(boden0.dca, display = "sites", col = gruppen$Gruppe4, pch=16,cex = 0.7)
points(boden0.dca, display = "sites", col = gruppen$Gruppe4, pch = 16, cex = 0.8)

umwelt0.env <- envfit(umwelt0.dca, umwelt0, perm=999)
plot(umwelt0.env, cex=0.7, col="darkorange")
plot(umwelt0.env, p.max = 0.05, col = "red", cex=0.7)
title(main=" Detrended Correspondenceanalysis (DCA)", sub="(Plot mit 8 Gruppen)", cex.sub=.75)

#####
## RDA ##
#####

boden0.rda<-rda((boden0.t),scale=TRUE)
summary(boden0.rda)
plot.ord(boden0.rda,env=umwelt0,choices=c(1,2),xlim=c(-1.5,1.5),ylim=c(-1.5,1.5),scaling=3,
grp=gruppen$Gruppe4,pc=c("black","red","green","blue"),pg=c(16,16,16,16),plabel=NULL,legend=TRUE)
title(main=" Redundanzanalyse (RDA)", sub="(Plot mit Zeilen in Prinzipalkoordinaten)", cex.sub=.75,)

# Zoom
par(mfrow=c(1,1))
plot(boden0.rda, choices = c(1,2), type= "n", xlim=c(-2,1.5), ylim=c(-1.5,3))
plot(boden0.rda, display = "sites", col = gruppen$Gruppe4, pch=16,cex = 0.7)
points(boden0.rda, display = "sites", col = gruppen$Gruppe4, pch = 16, cex = 0.8)
title(main=" Redundanzanalyse (RDA)", sub="(Plot mit Zeilen in Prinzipalkoordinaten)", cex.sub=.75,)

#####
## CCA ##
#####

boden0.cca<-cca(boden0)
summary(boden0.cca)
plot.ord(boden0.cca,env=umwelt0,choices=c(1,2),scaling=3,
grp=gruppen$Gruppe4,pc=c("black","red","green","blue"),pg=c(16,16,16,16),plabel=NULL,legend=TRUE, pmax=0.05)
title(main=" Korrespondenzanalyse (CCA)", sub="(Plot mit Umweltvariablen als Pfeile)", cex.sub=.75,)

```

Anhang 4

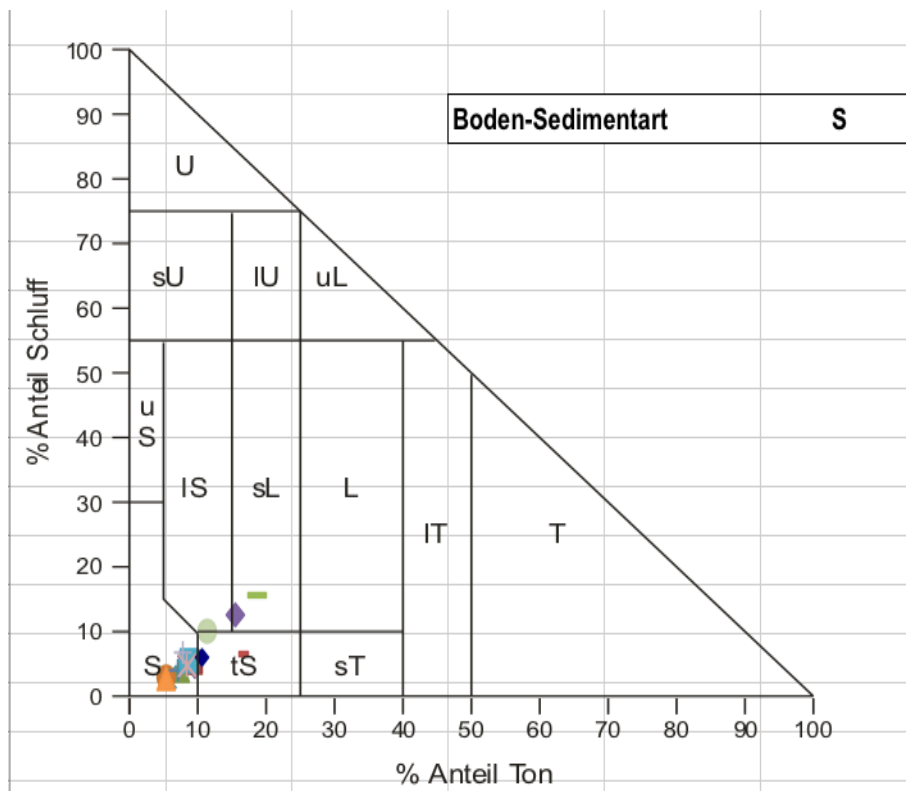


Abbildung 48: Korngrößendreieck Quasaa

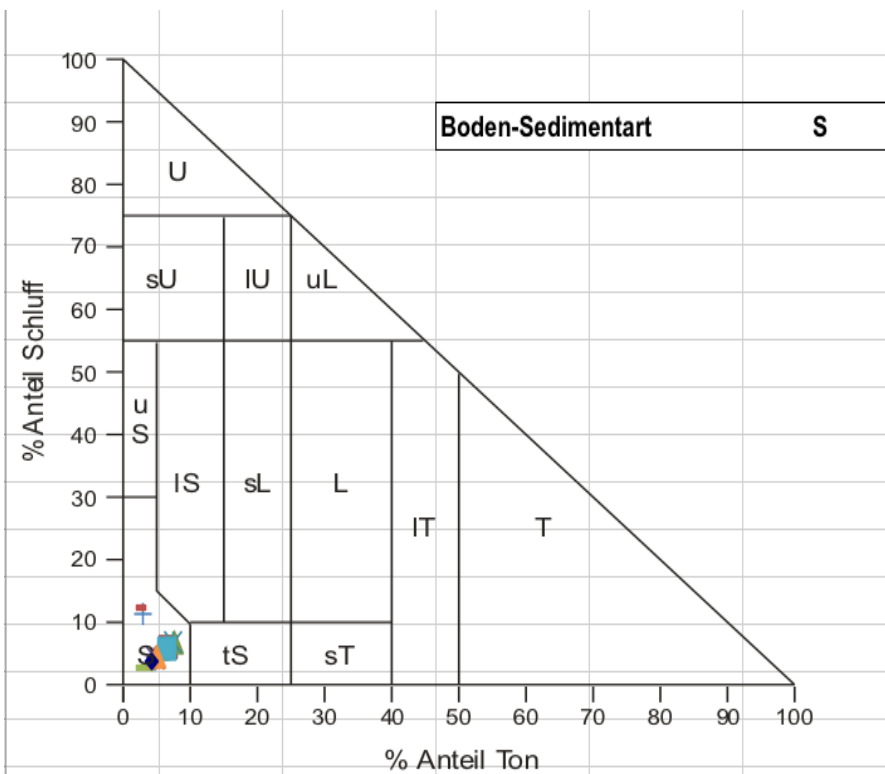


Abbildung 49: Korngrößendreieck Al Mamour

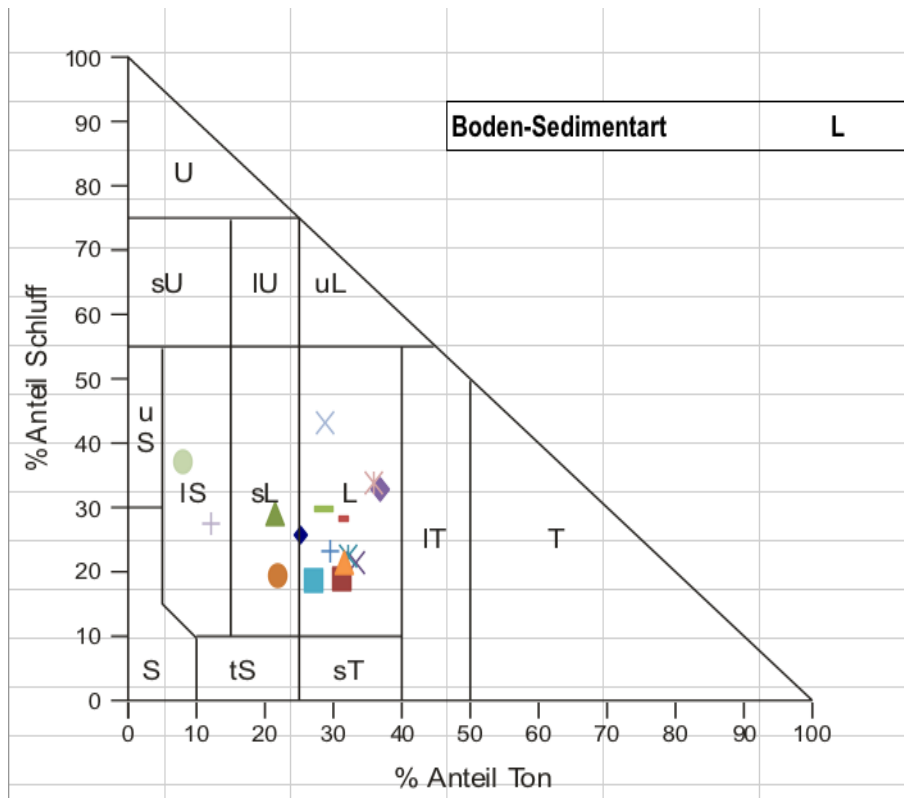


Abbildung 50: Korngrößendreieck Al Zabü

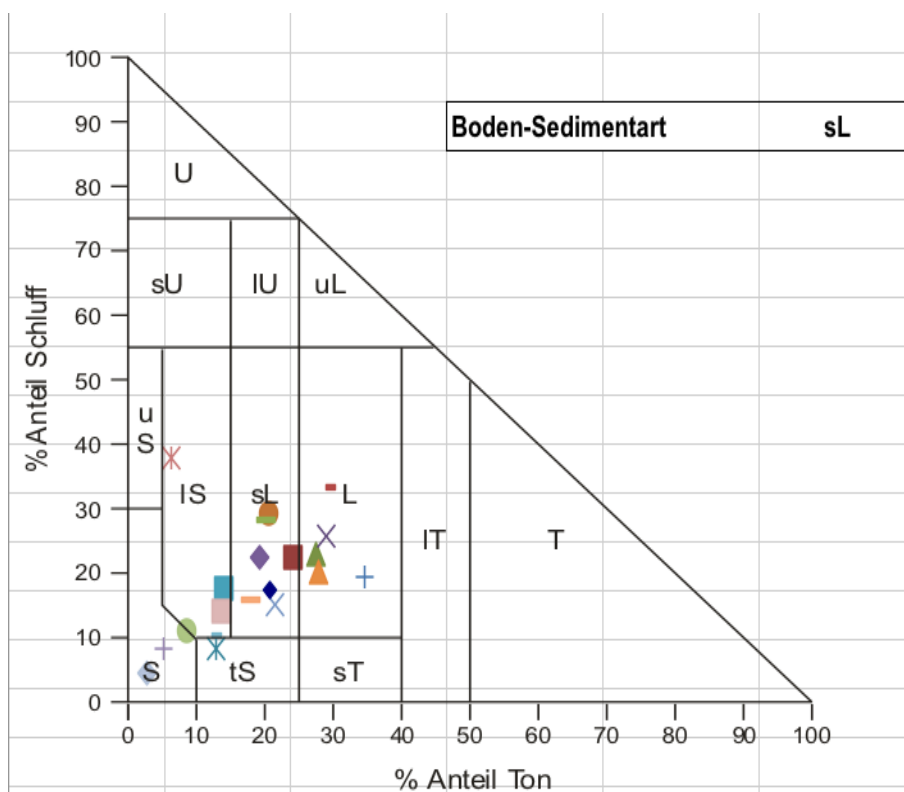


Abbildung 51: Korngrößendreieck Al Bawiti

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, im Oktober 2012

Unterschrift

Lebenslauf

Fleischanderl Regina, geboren am 08.04.1983 in Salzburg. Nach Abschluss der Volksschule in Anthering Besuch der AHS „Christian-Doppler-Gymnasium“ (neusprachlicher Zweig) in Salzburg. 2001: Abschluss mit Matura.

Im Wintersemester 2002 Beginn des Diplomstudiums Theoretische und Angewandte Geographie an der Universität Wien. Gewählter Schwerpunkt: Landschaftsökologie; absolvierte Wahlfächer zu Bodenkunde, Hydrologie und GIS.

2003 – 2004 Studium der Philosophie an der Universität Wien.

Oktober 2009 bis April 2010: Auslandsaufenthalt im Rahmen des Erasmus-Mobilitätsprogramms an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Deutschland. Gewählte Schwerpunkte: Statistik mit R, Vegetationsökologie, Bodenkunde und Hydrologie.

Wissenschaftlich relevante Praxis:

Juni 2006 bis Dezember 2007: freie Mitarbeiterin bei Freytag & Berndt, Abteilung Stadtpläne und Atlanten (Kartographie).

2012 als Tutorin für die Übungen zur Bodengeographie bei Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka, Universität Wien, tätig.

